



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIKKO ELO REAALIAIKAINEN VIEHEENTARKKAILUJÄRJESTELMÄ

Diplomityö

Tarkastaja: prof. Karri Palovuori
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiede-
kuntaneuvoston kokouksessa
3. kesäkuuta 2015

TIIVISTELMÄ

MIKKO ELO: Reaaliaikainen vieheentarkkailujärjestelmä

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 101 sivua, 13 liitesivua

Toukokuu 2016

Signaalinkäsittelyn ja tietoliikennetekniikan koulutusohjelma

Pääaine: Sulautetut järjestelmät

Tarkastaja: professori Karri Palovuori

Avainsanat: vetouistelu, syvyysmittaus, nopeusmittaus, lämpötilamittaus, akustinen tiedonsiirto

Tässä työssä suunniteltiin reaaliaikaisen vieheentarkkailujärjestelmän prototyyppi. Järjestelmä koostuu siimaan kiinnitettävästä anturista, joka lähettää mitaamansa tiedot ultraäänellä veneessä sijaitsevalle näyttölaitteelle. Mitattaviksi suureiksi valittiin syvyys, lämpötila ja nopeus. Nopeudella tarkoitetaan veden virtausnopeutta anturin ja vieheen suhteen. Lisäksi mitataan anturin litiumioniakun jännitettä.

Työssä tutkitut nopeudenmittaustekniikat perustuvat Pitot-putkeen tai termiseen mittaukseen. Syvyys mitataan hydrostaattisen paineen avulla. Sekä syvyyden että lämpötilan mittaus toteutettiin samalla integroidulla paine- ja lämpötila-anturilla. Akustiseen tiedonsiirtoon käytetään pietsosähköisiä muuntimia.

Nopeusmittausta ei onnistuttu toteuttamaan tutkituilla menetelmillä asetettujen tavoitteiden mukaisesti. Syvyyden, lämpötilan ja akkujännitteen mittausten suhteen tavoitteet kuitenkin saavutettiin hyvin. Toteutetulla järjestelmällä voidaan mitata lämpötilaa välillä 0–51,1°C (resoluutio 0,1°C), syvyyttä välillä 0–102,3 m (resoluutio 0,1 m) ja akkujännitettä välillä 3–4,25 V (resoluutio 50 mV).

Myös tiedonsiirron osalta tavoitteet täyttyivät. Tiedot lähetetään ultraäänellä kerran sekunnissa käyttäen PSK-avainnusta. Näyttölaitte demoduloi tiedot ohjelmallisesti toteutetun Costasin silmukan avulla. Käytännön kokeissa suurin osa lähetetyistä paketeista vastaanotettiin onnistuneesti vielä 150 m etäisyydeltä.

ABSTRACT

MIKKO ELO: Real-Time Lure Observation System

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 101 pages, 13 Appendix pages

May 2016

Master's Degree Programme in Signal Processing and Communications Engineering

Major: Embedded Systems

Examiner: Professor Karri Palovuori

Keywords: trolling, depth measurement, velocity measurement, temperature measurement, acoustic communication

This thesis covers the design procedures of a real-time lure observation system prototype for trolling. The system consists of a probe attached to the fishing line that sends measured information by an ultrasonic signal to a display unit located on the boat. Measured quantities include temperature, depth and velocity. Velocity means the water flow velocity by the probe and lure. Also, the voltage of the probe's lithium-ion battery is measured and sent to the display unit.

Techniques considered for velocity measurement were Pitot tube and thermal flow measurement. Depth measurement was based on hydrostatic pressure. Both depth and temperature were finally measured with an integrated pressure and temperature sensor. Piezoelectric transducers were used for the communication between the probe and the display unit.

Velocity measurement could not be implemented by the studied techniques, whereas depth, temperature and voltage measurements fulfilled the set requirements. The implemented system is able to measure temperature between 0–51.1°C (resolution 0.1°C), depth between 0–102.3 m (resolution 0.1 m) and battery voltage between 3–4.25 V (resolution 50 mV).

Set goals were also accomplished in the communication. The measured quantities are sent once per second by an acoustic signal using phase-shift keying. Sent packets are demodulated by the display unit using Costas loop implemented in software. In the experiments carried out in practical circumstances it was found out that more than half of the sent packets were successfully received at a distance of 150 meters.

ALKUSANAT

Työn aihe valikoitui vetouisteluharrastukseni perusteella. Aihe osoittautui diplomi-työn kannalta varsin laajaksi, mutta työn toteuttaminen oli kuitenkin mielekästä aiheen kiinnostavuuden vuoksi.

Haluan esittää kiitokseni professori Karri Palovuorelle työn kommentoinnista ja tarkastamisesta. Kiitän myös lämpimästi vanhempiani saamastani tuesta. Avopuolisolleni Sannalle esitän kiitokset työn oikoluvusta ja sen tekemisen aikana kotitöistä myönnetyistä vapautuksista.

Lopuksi haluan esittää varovaisen toiveen ja etukäteiskiitokset Ahdille seuraavista ennätyskaloistani.

Lempäälässä, 20.5.2016

Mikko Elo

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto	1
1.1 Vetouistelu	2
2. Tavoitteet	4
3. Kaupalliset mittalaitteet vetouisteluun	6
3.1 Fish Hawk X4/X4D	6
3.2 Moor Sub-Troll 900	6
3.3 Cannon IntelliTroll	7
3.4 Smart Troll	8
4. Teoria	10
4.1 Syvyyden mittaus	10
4.2 Nopeuden mittaus	12
4.2.1 Siipipyörä	12
4.2.2 Pitot-putki	13
4.2.3 Terminen mittaus	14
4.3 Tiedonsiirto	16
4.3.1 Pietzosähköinen muunnin	17
4.3.2 Kantama	18
4.3.3 Modulaatio	21
4.3.4 Ilmaisín	22
4.3.5 Haasteita akustisessa tiedonsiirrossa veden alla	24
5. Laitteistosuunnittelu	28
5.1 Anturi	28
5.1.1 Mikro-ohjain	28
5.1.2 Ultraäänilähetin	31
5.1.3 Ultraäänilähettimen ajuri	33
5.1.4 Termistorikytkentä nopeusmittaukseen	37
5.1.5 Syvyys- ja lämpötilamittaus	40
5.1.6 Paineanturi nopeusmittaukseen	42

5.1.7	Teholähde	44
5.2	Näyttölaite ja vastaanotin	45
5.2.1	STM32F4DISCOVERY-kokeilualusta	46
5.2.2	Näyttö	47
5.2.3	Vahvistin- ja suodinkytkenä	47
6.	Ohjelmistosuunnittelu	56
6.1	Anturi	57
6.2	Näyttölaite	59
6.3	Termistorikytkennän testiohjelma	62
6.4	Pitot-putkimittauksen testiohjelma	63
7.	Tulokset	65
7.1	Anturin mittaukset	65
7.1.1	Akkujännitteen mittaus	66
7.1.2	Hakkuri	67
7.1.3	Virrankulutus	70
7.2	Vahvistin- ja suodinkytkenä mittaukset	72
7.2.1	Taajuusvaste	73
7.2.2	Kohina	74
7.2.3	RF-suodatus	76
7.3	Ultraäänilähettimien ja -vastaanottimien mittaukset	78
7.4	Nopeusmittausten käytännön kokeet	79
7.4.1	Terminen mittaus	80
7.4.2	Pitot-putki	82
7.5	Järjestelmän käytännön kokeet	84
8.	Arviointi ja jatkokehitys	92
9.	Yhteenveto	95
	Lähteet	96

Liite A: Demodulaattorin ohjelmakoodi

Liite B: Ohjelmakoodi termistorikytkennän testaukseen

Liite C: Ohjelmakoodi MP3V5004-anturin testaukseen

KUVALUETTELO

1.1	Syvätakilan käyttö vetouistelussa.	2
1.2	Plaanareiden käyttö vetouistelussa.	3
2.1	Anturin vaihtoehtoiset kiinnityskohdat siimassa.	4
3.1	Fish Hawk X4D	7
3.2	Sub-Troll 900	7
3.3	Cannon IntelliTroll	8
3.4	Smart Troll -järjestelmä	9
4.1	Siipipyörään perustuvan virtausmittauksen periaate	12
4.2	Pitot-putken periaatteellinen rakenne	13
4.3	Pietsosähköisen muuntimen Butterworth-van Dyke -malli.	17
4.4	Digitaalinen Costasin silmukka.	22
4.5	Lähettimen keilat ja heijastukset	26
5.1	STM32F051-mikro-ohjaimen kytkentä oheiskomponentteineen.	29
5.2	Pietsosähköisen muuntimen impedanssin mittauskytkentä.	32
5.3	Pietsosähköisen muuntimen mitatut ja mallinnetut impedanssit.	32
5.4	L-sovituspää	33
5.5	L-sovituspää jännite	34
5.6	LT3572-kytkentä.	35
5.7	Hakkurin ulostulojännite kuormatransientissa ilman myötäkytkentä- kondensaattoria	37

5.8	Hakkurin ulostulojännite kuormatransientissa myötäkytkentä-kondensaattorin kanssa	38
5.9	Termistorikytkentä.	39
5.10	MS5541C- tai MS5803-14BA-anturin kytkentä.	42
5.11	MP3V5004-anturin kytkentä.	43
5.12	Teholähteen kytkentä.	45
5.13	Ultraäänivastaanottimen vahvistin- ja suodinkytkentä.	49
5.14	Vahvistin- ja suodinkytkennän kohina.	54
5.15	Vahvistin- ja suodinkytkennän Monte Carlo -analyysi	55
6.1	Periaatekuva paketin lähettämisestä.	59
7.1	Anturia varten rakennettuja prototyyppejä	66
7.2	Hakkurin ulostulon rippelijännite.	67
7.3	Hakkurin ulostulon rippelijännite lyhyemmältä ajalta	68
7.4	Hakkurin kytkimen ja H-sillan ulostulon jännitteet	69
7.5	Vahvistin- ja suodinlevy.	72
7.6	Vahvistin- ja suodinlevyille syötetty testisignaali	73
7.7	Rakennettujen vahvistin- ja suodinlevyjen mitatut taajuusvasteet.	74
7.8	Rakennettujen vahvistin- ja suodinlevyjen mitatut kohinat.	75
7.9	Matkapuhelimen aiheuttama häiriö TL974-kytkentään	77
7.10	Matkapuhelimen aiheuttama häiriö AD8648-kytkentään	77
7.11	Ultraäänivastaanottimien ulostulojännite	79
7.12	Termisen virtausmittauksen koejärjestelyt.	80
7.13	Terminen virtausnopeuden määrittäminen eri veden lämpötiloissa.	81
7.14	Terminen virtausnopeuden määrittäminen 21°C vedessä.	81

7.15 Pitot-putkeen perustuvan virtausmittauksen koejärjestely.	83
7.16 Anturin kotelointi käytännön kokeissa.	84
7.17 Ultraäänivastaanottimen suojaus käytännön kokeita varten.	85
7.18 Signaalin häipyminen pinnasta tapahtuvan heijastuksen vuoksi	86
7.19 Koejärjestely käytännön olosuhteissa suoritetuissa kokeissa.	87
7.20 Ultraäänivastaanottimien vertailu veden alla	88
7.21 Kaikuluotaimen aiheuttama häiriö	88
7.22 Costasin silmukan virheellinen toiminta vahvistimen ulostulon satu- roitua	90
7.23 Onnistunut vastaanotto haastavassa tilanteessa	91

TAULUKKOLUETTELO

5.1	Bessel-suotimen eri versioissa käytetyt vastusarvot.	55
6.1	Lähetettävän paketin sisältö.	57
7.1	Hakkurin hyötysuhde eri sisäänmenojännitteillä.	69
7.2	Anturin virrankulutus lepotiloissa eri kytkennöillä.	71
7.3	Vahvistin- ja suodinkytkenän eri versioiden vahvistuksen ja kohinan suhteet.	76
7.4	GPS-laitteella ja Pitot-putkella mitatut nopeudet.	83
7.5	Onnistuneesti vastaanotetut paketit 300 s aikana eri olosuhteissa. . .	91
9.1	Järjestelmän tarjoamat mittaustulokset	95

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AD	Analog to Digital
ASK	Amplitude-shift Keying
BER	Bit Error Ratio
BPSK	Binary Phase-shift Keying
DA	Digital to Analog
dB	Decibel, desibeli
DMA	Direct Memory Access
ESD	Electrostatic Discharge
FSK	Frequency-shift Keying
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
I ² C	Inter-integrated Circuit
ISI	Inter-symbol Interference
LCD	Liquid Crystal Display
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor Field-effect Transistor
NCO	Numerically Controlled Oscillator
NEB	Noise-equivalent Bandwidth
NiMH	Nickel-metal Hydride
NL	Noise Level
NTC	Negative Temperature Coefficient
PID	Proportional-Integral-Derivative
PLL	Phase-locked Loop
ppm	Parts per million
PSK	Phase-shift Keying
PWM	Pulse-width Modulation
RF	Radio Frequency
RMS	Root Mean Square
RTC	Real-time Clock
RVR	Receiving Voltage Response
SL	Source Level
SMA	Subminiature version A
SNR	Signal to Noise Ratio
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
TL	Transmission Loss
TVR	Transmitting Voltage Response
VCO	Voltage Controlled Oscillator
VLF	Very Low Frequency

α	absorptiovaimennus (dB/m)
Γ	heijastuskerroin
λ	lämmönjohtavuus (W/(K·m)) tai aallonpituus (m)
ξ	vaimennussuhde
ρ	tiheys (kg/m ³)
Φ	lämpövirta (W)
ω	kulmataajuus (rad/s)
A	pinta-ala (m ²) tai amplitudi (V)
B	kaistanleveys (Hz)
C	kapasitanssi (F)
f	taajuus (Hz)
g	putoamiskiihtyvyys (m/s ²)
H	vahvistus
h	korkeus tai syvyys (m) tai konvektiivinen lämmönsiirtokerroin (W/(K·m ²))
I	virta (A)
K	puristuvuuskerroin (Pa)
k_B	Boltzmannin vakio (1,38·10 ⁻²³ J/K)
L	induktanssi (H)
l	pituus (m)
p	paine (Pa)
Q	hyvyysarvo
R	halkaisija tai etäisyys (m) tai resistanssi (Ω)
T	lämpötila (°C tai K)
t	aika (s)
V	jännite (V)
v	nopeus (m/s)
X	reaktanssi (Ω)
Z	impedanssi (kg/(m ² s) akustinen, Ω sähköinen)

1. JOHDANTO

Tämän työn tavoitteena on suunnitella vetouisteluun mittausjärjestelmä, jolla voidaan reaaliaikaisesti kerätä tietoa vieheen nopeudesta ja sitä ympäröivistä olosuhteista. Ajatus tähän aiheeseen tuli kirjoittajan vetouisteluharrastuksesta. Tavoitteena on saada järjestelmän avulla vieheet uimaan oikeassa paikassa oikealla nopeudella ja näin parantaa kalansaannin todennäköisyyttä. Ja jos aika on väärä, niin ainakin mittaustulosten tarkkailu tarjoaa viihdykettä huonomman syönnin päiviin.

Mitattaviksi suureiksi valittiin nopeus, lämpötila ja syvyys. Lisäksi mitataan anturin akun jännite. Nopeudella tarkoitetaan vieheen nopeutta veden suhteen, joka voidaan mittauksen kannalta ajatella veden virtauksena vieheen ohi. Tämä haluttiin mitata, koska se vaikuttaa vieheen uintiliikkeeseen. Nopeuden mittaaminen esimerkiksi GPS-vastaanottimella ei kerro nopeutta veden suhteen, sillä se ei huomioi vedessä olevia virtauksia. Virtaus ei ole välttämättä samansuuruinen eri vesikerroksissa, joten myöskään pinnalta tehty virtausmittaus ei kerro oikeaa virtausta vieheen syvytydessä.

Lämpötila haluttiin mitata, sillä kalat viihtyvät parhaiten tietyllä lämpötila-alueella, joka vaihtelee kalalajeittain. Tässäkään tapauksessa pinnasta mitattu lämpötila ei välttämättä vastaa syvempien vesien lämpötilaa. Mitattavaksi suureeksi valittiin myös syvyys, sillä sen tarkka arviointi käytettäessä suuria siimapituuksia on haastavaa. Vieheen syvyyteen vaikuttavat ainakin käytetyn painon suuruus, uistelunopeus, virtaukset ja siiman paksuus.

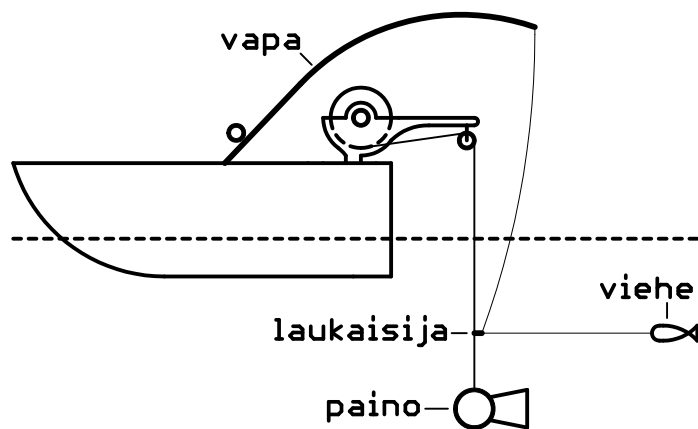
Johdannossa esitellään seuraavaksi lyhyesti vetouistelua ja siinä käytettäviä varusteita aihetta tuntemattomalle lukijalle. Luvussa 2 kerrotaan suunniteltavalle järjestelmälle asetetut tavoitteet. Markkinoilla on tarjolla erilaisia vetouisteluun suunniteltuja mittausjärjestelmiä, joista muutamia esitellään luvussa 3. Luvussa 4 perehdytään teoriaan tutkittavan aiheen taustalla ja tarkastellaan aiheeseen liittyvien aiempien tutkimusten tuloksia. Tämän jälkeen siirrytään teoriasta käytäntöön. Luku 5 käsittelee työssä toteutettavan laitteiston suunnittelua. Ohjelmisto puolestaan esitellään luvussa 6 ja saavutetut tulokset luvussa 7. Luvussa 8 arvioidaan tuloksia ja esitetään jatkokehitysideoita. Lopuksi tarjolla on yhteenveto luvussa 9.

1.1 Vetouistelu

Vetouistelu tai lyhyemmin pelkkä uistelu voidaan lyhyesti esittää kalastustapana, jossa yhtä tai useampaa viehettä vedetään veneen perässä. Veneen sijaan voidaan toki käyttää muitakin vesialuksia. Tavoitteena on saada saaliskala tarttumaan vieheessä olevaan koukkuun ja edelleen saada se kelattua veneeseen. Uistelun määritelmää voidaan tarkentaa puhumalla esimerkiksi soutu- tai moottoriuistelusta riippuen siitä, käytetäänkö veneen liikuttamiseen lihas- vai moottorivoimaa. Uistelua voidaan periaatteessa harjoittaa kaikissa vesistöissä, jotka ovat riittävän suuria mielekkääseen liikkumiseen veneellä tai muulla aluksella. Suomessa uistelua säädelään kalastuslailla [29].

Perusvarusteet uisteluun veneen lisäksi ovat vapa, kela, siima ja viehe. Yleensä, erityisesti moottoriuistelussa, samanaikaisesti uitetaan useampia vieheitä. Vieheenä käytetään esimerkiksi vaappuja, peltiuistimia ja täkyrakseja. Vaappu on useimmiten pientä kalaa muistuttava viehe, jolle uintilevy aiheuttaa keinahtelevan uintiliikkeen. Peltiuistin valmistetaan nimensä mukaisesti metallista ja sen uintiliikkeessä yhdistyy usein keinahtelu ja ympäri pyörähtely. Täkyraksissa käytetään syöttinä kuollutta pikkukalaa, jolle viritetään esimerkiksi pyörähtelevä uintiliike. Apuna voidaan käyttää raksihuppua, johon täkykala kiinnitetään päästään.

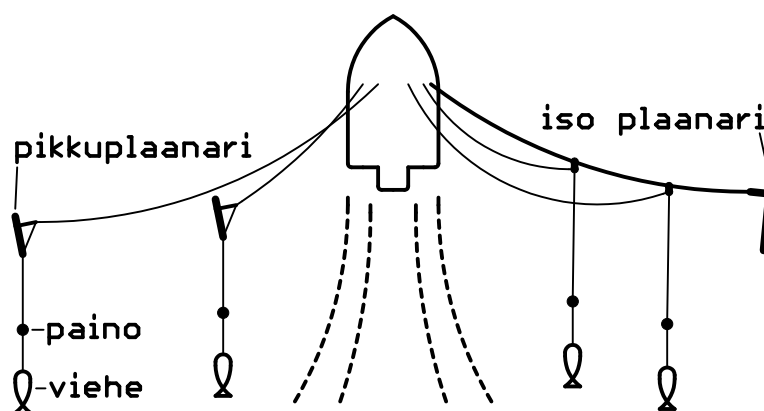
Näiden lisäksi käytössä on laaja kirjo muita varusteita. Vieheen syvyyden säätämiseen voidaan käyttää siimaan kiinnitettäviä painoja tai syväjälevyjä. Apuna voidaan käyttää myös syvätakilaa, jota jäljempänä kutsutaan lyhyesti takilaksi. Takila on periaatteltaan kuin vinssi, jossa vaijeri kulkee kelalta puomin päässä olevan rissan kautta painolle. Paino voi olla usean kilon painoinen, jolloin se voidaan vaijeriin kohdistuvasta vedenvastuksesta huolimatta laskea lähes pystysuoraan alas. Takilan periaate on esitetty kuvassa 1.1.



Kuva 1.1 Syvätakilan käyttö vetouistelussa.

Vavalta tuleva siima kiinnitetään takilavaijeriin tai -painoon laukaisijalla, joita on saatavilla monenlaisia. Yksinkertainen malli muistuttaa pyykkipoikaa, jonka leukojen väliin siima asetetaan. Siima pysyy leukojen välissä niin kauan kuin siiman toisessa päässä on pelkkä viehe. Kalan tarttuessa vieheeseen siima luistaa irti laukaisijasta, joten kalan väsytyksen aikana siimassa ei ole kiinni mitään ylimääräistä. Takilan avulla on siis mahdollista uittaa viehettä syvällä ilman siimassa olevia painoja. Lisäksi uintisyvyyttä on helppo muuttaa kesken kalastuksen. Samaan vaijeriin voidaan kiinnittää useita laukaisijoita. Takilan kela voi olla käsi- tai sähkökäyttöinen. Sähkötakiloista on tarjolla myös älykkäitä versioita, jotka voivat esimerkiksi pitää painon automaattisesti asetetulla etäisyydellä pohjasta.

Sivusuunnassa vieheitä voidaan uittaa kauempana veneestä käyttäen apuna plaanareita. Plaanarit voidaan jakaa kahteen päätyyppiin. Ensimmäinen on pikkuplaanari, joka kiinnitetään suoraan kalastussiimaan. Toinen on iso plaanari, joka kiinnitetään veneeseen vahvemmallalla siimalla tai narulla. Vieheille menevät siimat kulkevat tässä tapauksessa narussa roikkuvien laukaisijoiden kautta. Laukaisijat toimivat kuten takilan tapauksessa. Yksinkertaistettuna plaanari on siis pinnassa kulkeva levy, joka sopivan siiman kiinnityspisteen ansiosta kulkee vedettäessä veneen sivulla. Kuvassa 1.2 on esitetty molempien plaanarityyppien käyttö.



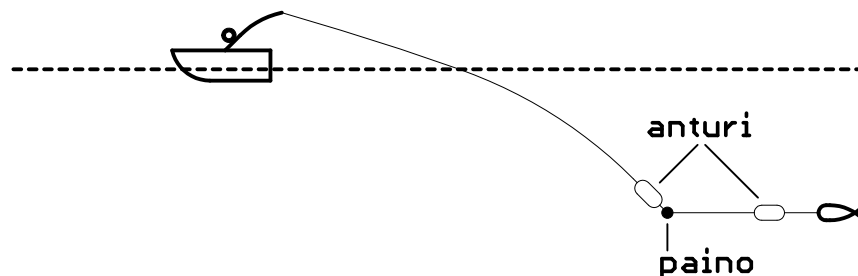
Kuva 1.2 Plaanareiden käyttö vetouistelussa.

Uistelussa käytetään apuna myös monenlaisia elektroniikkalaitteita. Paikannukseen voidaan käyttää joko yksinkertaisia GPS-vastaanottimia tai karttaplottereita. Kaikuluotaimella voidaan selvittää veden syvyys ja lisäksi sen avulla voidaan etsiä saalistettavia kaloja tai näiden ravintonaan käyttämien pienten kalojen parvia. Lisäksi käytössä on luvussa 3 esiteltäviä erityisesti uisteluun suunniteltuja mittalaitteita. Autopilotti helpottaa uistelua varsinkin kalastajan ollessa yksin liikkeellä. Turvallisuutta parantavia laitteita ovat esimerkiksi tutka ja radiopuhelin.

2. TAVOITTEET

Tekijän uisteluharrastus keskittyy lähinnä järvien selkävesillä tapahtuvaan lohikalajien ja kuhien uisteluun. Tyypillisesti käytössä on noin 10 vapaa ja apuvälineinä käytetään takiloita sekä pikkuplaanareita. Vieheenä on pääasiassa täkyraksi. Vesi-alueet, joilla uistellaan, ovat pääosin 20–50 m syviä. Vieheen uintisyvyys on yleensä alle 15 m, satunnaisesti enemmän. Suurimmat käytettävät siimanpituudet ovat noin 50 m. Pituus mitataan joko vavan kärjestä vieheelle, jos ei käytetä plaanaria, tai plaanarilta vieheelle. Painon etupuolet siimaa on yleensä 30 m. Uloimmat plaanarit ovat enimmillään noin 40 m veneen sivulla. Uistelunopeus on 2,5–3,5 km/h välillä. Näitä seikkoja käytettiin lähtökohtana tavoitteita asetettaessa.

Alusta asti oli selvää, että tiedonsiirtoon käytetään ultraääntä. Kantaman vähimmäistavoitteeksi asetettiin 30 m, jolloin anturi voidaan kiinnittää painon luokse. Olettaen, että viehe seuraa lähes samassa syvyydessä, halutut tiedot on mitattavissa jo painon luota. Kantamaksi pyritään kuitenkin saamaan vähintään 50 m. Tällöin anturi voidaan kiinnittää vieheen luokse ja mittaustulokset vastaavat paremmin vieheen olosuhteita. Vaihtoehtoiset anturin kiinnityskohdat on esitetty kuvassa 2.1. Ultraäänilähettimen suuntakuvio on oletettavasti keilamainen ja keilan leveydestä riippuu, kuinka hyvin tiedonsiirto onnistuu plaanarin perässä uitetulta anturilta. Tavoitteeksi asetettiin tässä vaiheessa järjestelmän toiminta, kun anturia vedetään suoraan veneen perässä. Tosin, kuten kuvasta 2.1 nähdään, myös anturin kiinnityskohta vaikuttaa keilan suuntaukseen. Lisäksi tutkitaan, kuinka anturia voisi käyttää takilavaijeriin kiinnitettynä.



Kuva 2.1 Anturin vaihtoehtoiset kiinnityskohdat siimassa.

Veden lämpötilan mittausalueeksi riittää Suomen olosuhteissa 0–30°C. Lämpötilan pienten muutosten seuraamiseksi lämpötilamittauksen resoluutiolle asetettiin tavoitteeksi 0,1°C. Lämpötilan tarkkuudeksi $\pm 1^\circ\text{C}$ on riittävä arvo. Tarkkuusvaatimusta ei ole tarkoitus varmentaa mittauksella vaan käytettävä lämpötila-anturi pyritään valitsemaan resoluutio- ja tarkkuusvaatimukset täyttäväksi.

Syvyysmittausalueen vähimmäistavoitteeksi asetettiin 0–20 m. Tämä riittää hyvin kirjoittajan käytössä, mutta järjestelmän yleiskäyttöisyyttä ajatellen mittausalue pyritään saamaan laajemmaksi. Syvyysmittauksen resoluutiolle asetettiin 0,25 m ja tarkkuudelle $\pm 0,5$ m tavoitteet.

Nopeusmittausalueen vähimmäistavoitteeksi asetettiin 2,5–3,5 km/h, joka on tekijän eniten käyttämä nopeusalue. Tässäkin kuitenkin tavoitellaan yleiskäyttöisyyden vuoksi laajempaa, 2–5 km/h, mittausaluetta. Jälleen tarkkaa nopeuslukemaa tärkeämpää on havaita pienet vieheen uintiin vaikuttavat muutokset. Näin ollen resoluutiolle asetettiin tavoitteeksi 0,1 km/h ja tarkkuudelle $\pm 0,3$ km/h.

Jotta voitaisiin puhua reaaliaikaisesta mittauksesta, on toivottavaa, että näytölle saadaan uusi mittaustulos korkeintaan kymmenen sekunnin välein. Syvyyden ja lämpötilan suhteen harvempikin mittausväli olisi riittävä. Veneen nopeuden säätäminen on kuitenkin mielekkäämpää, kun uudesta nopeudesta saadaan tieto mahdollisimman nopeasti.

Anturin toiminta-ajaksi päätettiin vähintään 5 h, jos anturissa käytetään helposti vaihdettavia paristoja tai akkuja. Jos käytetään kiinteää tai hankalasti vaihdettavaa teholähdettä, niin toiminta-aikaa tulisi olla vähintään 12 h, jotta järjestelmä on käytettävissä pidemmänkin uistelupäivän ajan. Lähetettävän akkujännitteen tarkkuudeksi ja resoluutioksi päätettiin 0,1 V.

Tämän työn osalta päätettiin, että järjestelmä käyttää vain yhtä anturia kerrallaan. Useamman anturin samanaikainen käyttö jää jatkotutkimuksen aiheeksi. Lisäksi anturin tulisi olla mahdollisimman pienikokoinen, jotta sitä on mielekästä käyttää. Liian suuri anturi aiheuttaa turhaan veden vastusta ja vaatii suurempien painojen käyttöä.

3. KAUPALLISET MITTALAITTEET VETOUISTELUUN

Tässä luvussa esitellään neljä kaupallisesti tarjolla olevaa mittalaitetta veto-
uisteluun. Näistä kolme käyttää takilavaijeriin asennettavaa anturia ja Smart Troll
on ainoa, jossa käytetään siimaan kiinnitettävää anturia. Kaikilla järjestelmillä
voidaan mitata lämpötilaa ja nopeutta vieheen syvyydessä, osalla lisäksi syvyyttä.
Nopeuden mittaaminen perustuu kaikissa siipipyörään. Tiedonsiirto tapahtuu joko ultra-
äänellä tai siirtotienä käytetään takilavaijeria.

3.1 Fish Hawk X4/X4D

Fish Hawk Electronics tarjoaa Fish Hawk X4 ja X4D -järjestelmiä. Seuraa-
vaksi esiteltävät ominaisuudet on koottu näiden käyttöohjeesta [21]. Molemmat
järjestelmät koostuvat takilavaijeriin asennettavasta upotettavasta anturista ja
veneeseen asennettavasta vastaanottimesta sekä näytöstä. X4-järjestelmän anturi
mittaa lämpötilaa ja nopeutta. X4D mittaa näiden lisäksi syvyyden. Upotettavan
anturin teholahteenä toimii 4 AA-paristoa, joilla luvataan toiminta-aikaa yli 100 h.
Tiedonsiirtoon käytetään ultraääntä 70 kHz taajuudella. Anturin luvataan toimivan
1–300 ft (noin 0,3–90 m) syvyyksissä.

Molemmat järjestelmät mittaavat lisäksi lämpötilan ja nopeuden pinnalla. X4D-
järjestelmän näyttölaite voi lähettää tiedot edelleen Bluetooth-yhteydellä matka-
puhelimien. Nopeutta voidaan mitata välillä 0,4–11 mph (noin 0,6–18 km/h) ja
lämpötilaa välillä 32–104°F (noin 0–40°C). Laite voidaan asettaa näyttämään tiedot
myös metrisissä yksiköissä. Näyttölaite ja vastaanotin tarvitsevat 12 V jännitteen.
Fish Hawk X4D -järjestelmä on esitetty kuvassa 3.1.

3.2 Moor Sub-Troll 900

Moor Electronicsin Sub-Troll 900 -järjestelmän tiedot haettiin laitteen verkkosivulta
[37]. Järjestelmä koostuu takilavaijeriin kiinnitettävästä anturista ja veneeseen asen-
nettavasta näyttölaitteesta. Sillä voidaan mitata nopeutta ja lämpötilaa. Mittaus-
alueita ei kuitenkaan ilmoiteta. Tosin kuvan 3.2(a) perusteella nopeusalue on



Kuva 3.1 Fish Hawk X4D [22].

0–6 mph eli noin 0–10 km/h. Upotettavan anturin tehollähteenä käytetään 9 V paristoa ja toiminta-ajaksi luvataan 160 h. Toimintasyvyudeksi luvataan 200 ft eli noin 60 m.

Tieto siirretään eristetyssä takilavaijerissa RF-signaalin (*Radio Frequency*) avulla. Vaijerin ympärille tuleva vastaanottimen antenni voidaan kiinnittää takilan puomiin. Näyttölaitteen käyttöjännite on 12 V. Näyttölaitte esittää ilmeisesti nopeuden ja lämpötilan ainoastaan yksiköissä mph ja °F. Nopeus esitetään viisari-näytöllä ja lämpötila kuvan 3.2 perusteella LCD-näytöllä (*Liquid Crystal Display*) 0,1°F resoluutiolla.



(a) Sub-Troll 900 -näyttö



(b) Sub-Troll 900 -anturi

Kuva 3.2 Sub-Troll 900 [37].

3.3 Cannon IntelliTroll

Seuraavaksi tarkastellaan Cannon IntelliTroll -järjestelmän ominaisuuksia käyttö-ohjeen [14] pohjalta. Järjestelmä koostuu takilavaijeriin kiinnitettävästä anturista ja veneeseen tulevasta näyttölaitteesta. Myös IntelliTroll käyttää tiedonsiirtoon takilavaijeria. Anturi mittaa nopeuden, lämpötilan ja syvyyden. Tehollähteenä käytetään

neljää AA-paristoa, joilla anturi on suunniteltu toimimaan yli 200 h ajan. Suurinta toimintasyvyyttä ei ilmoiteta.

Näyttölaite toimii 9–14 V jännitteellä. Tiedot voidaan esittää joko metrisissä tai imperiaalisissa yksiköissä. Mittausalueita ei ilmoiteta. Käyttöohjeessa olevan kuvan [14, s. 16] perusteella imperiaalisia yksiköitä käytettäessä syvyys esitetään 1 ft, nopeus 0,1 mph ja lämpötila 1°F resoluutiolla.

Näyttölaitteen sijaan IntelliTroll-järjestelmän antenni voidaan kytkeä myös Cannon Digi-Troll 5 tai Digi-Troll 10 -sähkötakiloihin. Tällöin tiedot voidaan lukea takilan näytöltä (Digi-Troll 10) tai lähettää edelleen yhteensopivalle Humminbird-kaikuluotaimelle (Digi-Troll 5). Cannon IntelliTroll -järjestelmä on esitetty kuvassa 3.3.



Kuva 3.3 Cannon IntelliTroll [14].

3.4 Smart Troll

Smart Troll -järjestelmä perustuu siimaan kiinnitettäviin antureihin eli se vastaa tässä työssä suunniteltavaa järjestelmää. Järjestelmän ominaisuuksiin tutustuttiin sen verkkosivustolla [50]. Sen osat ovat anturit, hydrofoni ja vastaanotin. Antureita on kahta mallia. Ensimmäinen mittaa vain lämpötilaa ja syvyyttä ja toinen malli näiden lisäksi myös nopeutta. Anturit lähettävät mittaamansa tiedot akustisena signaalina muutaman sekunnin välein. Toimintasyvyys on testattu ainakin 300 ft eli noin 90 m asti. Käytössä voi olla samanaikaisesti 6 anturia. Anturit on

varustettu kiinteällä akulla, jolla luvataan noin 15 h toiminta-aika. Anturit ladataan niille tarkoitettulla laturilla. Sylinterimäinen anturi on pituudeltaan alle 4" ja halkaisijaltaan 0,5" eli noin $10\text{ cm} \times 1,27\text{ cm}$.

Vastaanottoimeen liitetty hydrofoni muuttaa vastaanotetun akustisen signaalin sähköiseksi. Tiedonsiirron luvataan toimivan jopa 900 ft (noin 275 m) etäisyydellä riippuen olosuhteista. Vastaanotin lähettää vastaanotetut tiedot edelleen Bluetooth-yhteydellä Android-puhelimissa toimivaan sovellukseen. Järjestelmään ei siis kuulu muuta näyttölaitetta. Vastaanotin toimii 12 tai 24 V jännitteellä. Mittaustarkkuudeksi luvataan syvyydelle $\pm 1\text{ ft}$, lämpötilalle $\pm 1^\circ\text{F}$ ja nopeudelle $\pm 0,2\text{ mph}$. Mitta-alueita ei ilmoiteta. Kuvassa 3.4 on esitetty Smart Troll -järjestelmän anturi ja vastaanotin.



Kuva 3.4 Smart Troll -järjestelmän nopeusmittauksella varustettu anturi ja vastaanotin [50].

4. TEORIA

Tässä luvussa esitellään teoreettinen tausta mittauksille ja tiedonsiirrolle. Mitattavia suureita ovat syvyys, veden virtausnopeus ja lämpötila. Lämpötilamittauksen tarkempaa käsittelyä ei kuitenkaan katsottu tarpeelliseksi. Mittaustekniikoista esitellään tutkitut vaihtoehdot ja niiden hyvät sekä huonot puolet. Seuraavaksi perehdytään tiedonsiirron teoriaan tutkittavan aiheen näkökulmasta. Lisäksi tarkastellaan vedenalaisen ympäristön tiedonsiirrolle asettamia haasteita.

4.1 Syvyyden mittaus

Syvyyden mittaamiseen mietittiin kahta tekniikkaa - kaikuluotausta ja hydrostaattisen paineen mittausta. Kaikuluotauksessa lähetetään akustinen signaali kohti pintaa, minkä jälkeen odotetaan heijastuvaa signaalia. Lähetyksen ja vastaanoton välisen ajan perusteella määritetään syvyys. Ongelmaksi muodostuu ainakin anturin asennon vaikutus mittaustulokseen, sillä riittävän vinosti pintaan nähden lähetetty signaali ei heijastu takaisin anturille. Lisäksi tarvittava laitteisto muodostuisi todennäköisesti monimutkaisemmaksi ja enemmän tilaavieväksi verrattuna integroituun paineanturiin vähäisine oheiskomponentteineen. Näin ollen tarkempaan tutkimukseen valittiin hydrostaattisen paineen mittaus.

Veden alla tietyssä syvyydessä vallitsee paine p , joka voidaan esittää kaavalla:

$$p = p_0 + p_h = p_0 + \rho gh, \quad (4.1)$$

jossa p_0 on pinnalla vallitseva ilmanpaine, p_h hydrostaattinen paine, ρ veden tiheys, g putoamiskiihtyvyys ja h syvyys. Syvyys voidaan siis määrittää mitatun paineen perusteella, jos ilmanpaine tunnetaan. Tarkastellaan seuraavaksi mahdollisesti mittausrvirhettä aiheuttavia tekijöitä. Tässä putoamiskiihtyvyyttä g oletetaan vakioksi $9,81 \text{ m/s}^2$.

Normaali ilmanpaine merenpinnan tasolla on $1013,25 \text{ hPa}$ [58, s. 278]. Tätä korkeammalle noustaessa paine laskee noin 12 Pa/m . Ilmanpaine kuitenkin vaihtelee sääolojen mukaan. Suomessa mitatut ääripäät ovat 940 hPa ja 1066 hPa merenpinnan tasolle muunnettuna [56]. Esimerkiksi $\pm 30 \text{ hPa}$ vaihtelun vaikutus syvyyden mittaukseen on noin $\pm 30 \text{ cm}$. Tämä virhe voidaan kumota mittaamalla vallitsevaa

ilmanpainetta veneessä olevalla laitteistolla ja vähentämällä tulos anturin mittaamasta paineesta. Sään aiheuttamat ilmanpaineen muutokset tapahtuvat kuitenkin varsin hitaasti, yleensä noin 1–2 hPa/h [27]. Näin ollen hyvään tarkkuuteen päästään myös, jos anturi mittaa ilmanpaineen ennen upotusta ja vähentää tämän pinnan alla saaduista tuloksista.

Veden tiheys riippuu lämpötilasta, paineesta ja suolapitoisuudesta. Tarkastellaan näiden vaikutuksia mittaustulokseen 30 m syvyydessä. Lähteessä [58, s. 318] ilmoitetaan puhtaan veden tiheydeksi $999,975 \text{ kg/m}^3$, kun lämpötila on 4°C ja paine $1013,25 \text{ hPa}$. Veden tiheys on tässä lämpötilassa suurimmillaan. Lämpötilan ollessa 25°C tiheys on $997,048 \text{ kg/m}^3$. Oletetaan, että makean järviveden tiheys on hyvin lähellä puhtaan veden tiheyttä. Lasketaan lämpötilan vaikutukset syvyysmittaukseen olettaen anturin yläpuolella oleva vesipilari tasalämpöiseksi ja ilmanpaine p_0 nollassi. Tällöin kaavan (4.1) avulla paineeksi 30 m syvyydessä saadaan $294,3 \text{ kPa}$ ja $293,5 \text{ kPa}$, kun lämpötilat ovat 4°C ja 25°C . Kun näistä lasketaan syvyys käyttäen tiheytenä ääripäiden keskiarvoa $998,5 \text{ kg/m}^3$ saadaan tuloksiksi $30,04 \text{ m}$ ja $29,96 \text{ m}$. Virhe on siis $\pm 4 \text{ cm}$, joka on selvästi asetetun tarkkuusvaatimuksen sisällä.

Meriveteen liuonneiden suolojen vuoksi sen tiheys on suurempi kuin makealla vedellä. Lähteessä [58, s. 304] kerrotaan meriveden tiheydeksi 1020 kg/m^3 , kun lämpötila on 18°C . Tällä tiheydellä hydrostaattinen paine 30 m syvyydessä on $300,2 \text{ kPa}$. Jos tästä määritetään syvyys käyttäen tiheyden arvona $998,5 \text{ kg/m}^3$, saadaan tulokseksi $30,6 \text{ m}$, mikä ylittää asetetun tarkkuusvaatimuksen. Näin ollen, jos laitetta halutaan käyttää merivedessä kelvollisella tarkkuudella, tulee laskuissa käytettävää tiheyttä korjata vastaamaan paremmin todellista arvoa. Meriveden suolapitoisuus, ja sen myötä tiheys, vaihtelee myös alueittain ollen pienempi esimerkiksi lähellä jokisuita. Järjestelmässä tulisi siis olla mahdollista säätää tiheyden arvoa eri olosuhteita varten.

Paineen alla nesteen tilavuus pienenee massan pysyessä samana, joten sen tiheys kasvaa. Tämä voidaan ilmaista kaavalla:

$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{1 - \frac{\Delta p}{K}}, \quad (4.2)$$

jossa Δp on paineen muutos, ρ_0 alkuperäinen tiheys, ρ_1 tiheys paineen muutoksen jälkeen ja K puristuvuuskerroin. Veden puristuvuuskerroin 20°C lämpötilassa on noin $2,2 \text{ GPa}$ [58, s. 312]. Tällöin 300 kPa paineen lisäys, joka vastaa noin 30 m syvyyttä, kasvattaa tiheyttä noin 136 ppm. Anturin yläpuolella olevan vesipilarin keskimääräisen tiheyden muutos on tätäkin pienempi, joten paineen aiheuttaman

tiheydenmuutoksen vaikutus mittaustulokseen on muutamia millimetrejä ja voidaan jättää huomioimatta.

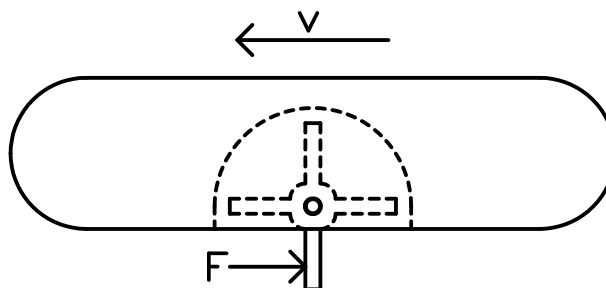
4.2 Nopeuden mitta

Nopeudella tarkoitetaan tässä työssä vesinopeutta eli anturin ja vieheen nopeutta ympäröivään veteen nähden. Käytännössä siis mitataan veden virtausta anturin ohi. Harkittuja tekniikoita virtauksen mittaamiseen ovat siipipyörä, Pitot-putki ja terminen mitta.

4.2.1 Siipipyörä

Virtauksen voimasta pyörivään siipipyörään perustuva mitta on tyypillinen ratkaisu vastaavissa laitteissa [14, 21, 37, 50]. Siipipyörä sijoitetaan osittain anturin ohi kulkevaan virtaukseen, jolloin virtaus saa sen pyörimään. Pyörimisnopeus mitataan ja sen perusteella määritetään virtausnopeus. Mittaukseen voidaan käyttää esimerkiksi Hall-anturia. Siipipyörän yhteen tai useampaan lapaan kiinnitetään kestopagneetti ja Hall-anturi sijoitetaan lähelle ulkokehää. Anturi tuottaa pulssin aina magneetin ohittaessa sen, jolloin pulssien taajuuden perusteella voidaan määrittää pyörimisnopeus.

Tämän mittaustavan etuna olisi todennäköisesti hyvin pieni virrankulutus. Haittapuolena on ainakin anturin asennon vaikutus mittaustulokseen. Jos ajatellaan, että periaatekuvan 4.1 anturia käännetään 90° myötäpäivään, niin tällöin kahteen vastakkaiseen lapaan kohdistuu yhtäsuuret voimat, joten siipipyörä ei pyöri. Lisäksi siipipyörällä varustetun anturin prototyypin valmistus koettiin hankalaksi. Tässä työssä haluttiin myös tutkia vaihtoehtoja tälle paljon käytetylle tekniikalle, joten siipipyörään perustuvaa mittausta ei tutkittu tarkemmin.



Kuva 4.1 Siipipyörään perustuvan virtausmittauksen periaate. Kuvassa v on anturin nopeus ja F virtauksen siipipyörään kohdistama voima.

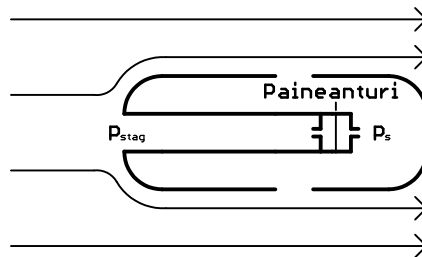
4.2.2 Pitot-putki

Pitot-putki on Henri Pitot'n 1700-luvulla keksimä mittalaite, jonka avulla voidaan mitata fluidien virtausnopeutta. Sen hyvin tunnettu käyttökohde on ilma-alusten ilmanopeuden mittaaminen. Lisäksi sitä käytetään muun muassa teollisuudessa virtausmittauksiin ja vesialusten vesinopeuden mittaamiseen.

Pitot-putken suulla oleva mittaussaukko kohdistetaan virtausta vasten. Virtaus kasvattaa putken suulla vallitsevaa painetta. Paine tunnetaan nimellä kokonais- eli stagnaatiopaine p_{stag} , joka on dynaamisen paineen p_d ja staattisen paineen p_s summa. Staattinen paine on pisteessä ilman Pitot-putken aiheuttamaa häiriötä vallitseva paine. Paineet voidaan esittää seuraavalla kaavalla:

$$p_{stag} = p_s + p_d = p_s + \frac{1}{2}\rho v^2, \quad (4.3)$$

jossa ρ on fluidin tiheys ja v virtauksen nopeus.



Kuva 4.2 Pitot-putken periaatteellinen rakenne.

Tässä työssä tutkittavassa tilanteessa staattinen paine on Pitot-putken suun syvyydellä vallitseva hydrostaattisen paineen ja ilmanpaineen summa, mikä esiteltiin kaavassa (4.1). Se voidaan mitata yhdellä tai useammalla virtaukseen nähden kohtisuorassa olevalla mittaussaukolla. Kuvassa 4.2 on esitetty yksinkertaistettu rakennekuva Pitot-putkesta virtauksessa. Kun paineet p_{stag} ja p_s mitataan differentiaalisella paineanturilla, ulostulo kertoo suoraan dynaamisen paineen p_d . Kaavan (4.3) avulla laskettuna tavoitellulla 2–5 km/h nopeusalueella dynaaminen paine vaihtelee noin 150–1000 Pa välillä. Kun p_d tunnetaan, vesinopeus voidaan määrittää kaavalla

$$v = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}}. \quad (4.4)$$

Veden tiheyden vaihtelu aiheuttaa jälleen virhettä mittaustulokseen. Neliöjuuri kaavassa (4.4) kuitenkin pienentää sen vaikutusta. Makean veden eri lämpötilojen välillä virhe on mitätön. Jos mittaus suoritetaan merivedessä, jonka tiheys on 1020 kg/m³, käyttäen nopeuden määrittämiseen tiheyttä 998,5 kg/m³, saadaan

tulokseksi noin 1,1 % suurempia nopeuksia. Tämän vuoksi 0,1 km/h tarkkuudelle pyöristetty tulos on 0,1 km/h liian suuri 4,7–5 km/h nopeuksilla, mikä on asetettujen tavoitteiden rajoissa. Virhe on toki korjattavissa käyttämällä laskuissa todellista tiheyttä merivedessä uisteltaessa.

Toinen ongelma on siipipyöränkin tapauksessa esitetty anturin asennon vaikutus mittaustulokseen, kun mittausaukot eivät ole oikeassa kulmassa virtaukseen nähden. Lisäksi anturin ulkomuodon suunnittelussa tulee huomioida virtaukseen muodostuvat pyörteet ja mittausaukkojen sijainti, jotta mittaustulokseen ei aiheudu ylimääräistä virhettä.

4.2.3 Terminen mittaus

Kolmas tutkittu tekniikka on terminen mittaus. Tämän tunnettu sovellus on kuumalanka-anemometri, jota käytetään ilman tai muun kaasun virtauksen mittaamiseen esimerkiksi meteorologiassa ja autojen moottorinohjausjärjestelmissä. Eristämätön ohut lanka ei sovellu vesiolosuhteisiin, mutta vedessä antureina voidaan käyttää esimerkiksi kuumakalvoanturia tai termistoria. Tässä työssä päätettiin tutkia jälkimmäisiä. Lyhyesti esitettynä termistorit ovat vastuksia, joiden resistanssi riippuu lämpötilasta.

Kun termistorin lämpötila on suurempi kuin ympäröivän veden, lämpöenergiaa siirtyy termistorista veteen. Tämä lämpövirta riippuu lämpötilaerosta ja virtausnopeudesta. Termistoriin syötetty sähköenergia muuttuu lämpöenergiaksi, joka kulkee ensin johtumalla termistorin koteloinnin läpi. Johtuva lämpövirta Φ_j voidaan yleisesti esittää kaavalla

$$\Phi_j = \lambda A \frac{\Delta T}{l}, \quad (4.5)$$

jossa λ on lämmönjohtavuus, A pinta-ala, jonka läpi energia siirtyy, ΔT lämpötilaero alku- ja loppupisteen välillä ja l näiden välimatka. Tämä yhtälö kuvaa lämpövirtaa yksiulotteisesti kahden pinnan välillä. Jos termistori oletetaan palloksi, niin johtuvaksi lämpövirraksi Φ_j saadaan

$$\Phi_j = 4\pi\lambda \frac{\Delta T}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}, \quad (4.6)$$

jossa R_1 on resistiivisen elementin halkaisija ja R_2 kotelon ulkohalkaisija. Tässä tapauksessa ΔT on lämpötilaero resistiivisen elementin ja kotelon pinnan välillä.

Lämmön siirtymistä termistorin pinnalta veteen kutsutaan konvektioksi. Lämpö siirtyy ensin johtumalla pinnalta veteen. Vedessä lämpö siirtyy sekä johtumalla että virtauksen mukana. Termistorin ollessa paikallaan seisovassa vedessä termistorin pintaa vasten oleva vesi lämpenee, jolloin sen tiheys lämpölaajenemisen myötä

laskee. Tämä aiheuttaa pienen virtauksen, joka kuljettaa lämpöenergiaa pois termistorilta. Tällöin kyseessä on luonnollinen konvektio. Kun termistori on liikkeessä, sen ohi kulkee voimakkaampi virtaus, joka siirtää lämpöenergiaa vielä tehokkaammin. Nyt puhutaan pakotetusta konvektiosta. Konvektiivisen lämpövirran Φ_k kaava on:

$$\Phi_k = hA\Delta T, \quad (4.7)$$

jossa h on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, A on pinnan ala ja ΔT lämpötilaero pinnan ja ympäristön välillä. Lämmönsiirtokerroin riippuu muun muassa veden ominaisuuksista, termistorin geometriasta ja virtausnopeudesta. Veden ominaisuudet, kuten viskositeetti ja tiheys, riippuvat sen lämpötilasta. Käytännössä lämmönsiirtokerroin on määritettävä kokeellisesti eri lämpötiloissa ja virtausnopeuksissa.

Tasapainotilassa teholla P termistoriin syötettävä sähköenergia muuttuu lämpöenergiaksi ja siirtyy kokonaisuudessaan veteen, jolloin

$$P = \Phi_j = \Phi_k. \quad (4.8)$$

Tällöin teho ja lämpövirta voidaan esittää Kingin lain mukaan kaavalla

$$P = h(v)\Delta T = (A + B\sqrt{v})\Delta T, \quad (4.9)$$

jossa $h(v)$ on termistorin lämmönjohtavuuden ja konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen yhdistävä virtausnopeudesta v riippuva lämmönsiirtokerroin. A ja B ovat kokeellisesti selvitettäviä vakioita tietyssä veden lämpötilassa ja ΔT on lämpötilaero resistiivisen elementin ja veden välillä. Kaavassa (4.9) esiintyvälle lämmönsiirtokertoimelle $h(v)$ on olemassa useita vaihtoehtoisia kaavoja, joita on esitelty ja vertailtu lähteessä [36, s. 24, 99–106]. Lähteen mukaan kaavassa (4.9) esitetty muoto pätee lähinnä silloin, kun anturina käytetään kuumennettua lankaa. Parhaiten termistoria kuvasi lähteessä kehitetty esitys

$$P = A + B \ln v + C(\ln v)^2 + D(\ln v)^3, \quad (4.10)$$

jossa A , B , C ja D ovat kokeellisesti selvitettäviä vakioita ja lämpötilaero on sisällytetty vakioihin. Lämmönsiirtokertoimen $h(v)$ tarkka määrittäminen ei toki ole tarpeen, jos toteutetun virtausmittarin ulostulosuurelle ja mitatulle nopeudelle voidaan muuten määrittää yhteys.

Termisissä anemometreissä yleensä jokin muuttuja vakioidaan. Esimerkkeinä voidaan antaa vakioteho- ja vakiolämpötila-anemometrit. Vakioteho-anemometrissä anturille, tässä tapauksessa termistorille, syötetään vakioteho. Tällöin ulostulona toimii termistorin lämpötila, joka pienenee virtauksen kasvaessa. Vastaavasti

vakiolämpötila-anemometrissä termistori lämmitetään tiettyyn lämpötilaan tai tietyn lämpötilaeron verran ympäristöä kuumemmaksi. Tällöin nopeus voidaan määrittää syötetyn tehon perusteella. Teho kasvaa virtauksen kasvaessa.

Tasapainotilan sijaan on mahdollista hyödyntää myös muutosilmiöitä. Lähteessä [33] on esitetty ilmavirran mittaukseen anemometri, jossa termistori lämmitetään alkulämpötilasta 70°C lämpötilaan 130°C . Ilmavirran nopeus määritetään nyt syötetyn energian perusteella. Tämä perustuu siihen, että lämpöenergiaa sitoutuu termistorin lämmitessä sen lämpökapasiteettiin. Osa lämmitysenergiasta poistuu kuitenkin ohi kulkevan virtauksen mukana. Näin ollen suuremmalla virtausnopeudella joudutaan siirtämään enemmän energiaa lämpötilamuutoksen aikaansaamiseksi.

Kuten kaavoista (4.9) ja (4.10) nähdään, termisen mittauksen yksi haaste on herkkyyden lasku virtauksen kasvaessa. Ulostulosuure muuttuu nopeasti pienillä virtauksilla, mutta muutos hidastuu virtausnopeuden kasvaessa. Toinen haaste termiselle virtausmittaukselle on kuplien muodostuminen termistorin pintaan, kun termistorin ja veden lämpötilaero kasvaa riittävän suureksi. Lähteessä [36, s. 79] esitettyjen aikaisempien tutkimusten mukaan kuumakalvoantureita käyttäen tämä raja on 20°C . Lähteessä havaittiin kuitenkin rajan olevan termistoreita käytettäessä 25°C johtuen näiden paksummasta pinnoituksesta, minkä vuoksi pintalämpötila on pienempi. Tämä asettaa rajat, kuinka suurta tehoa tai lämpötilaeroa voidaan mittauksessa käyttää.

Termisellä virtausmittauksella on yksi etu muihin tekniikoihin nähden: termistori voidaan oletettavasti sijoittaa anturissa sopivaan kohtaan niin, että sen ohi kulkeva virtaus on samanlainen anturin asennosta riippumatta. Tällöin anturin asennolla ei ole vaikutusta mittaustulokseen.

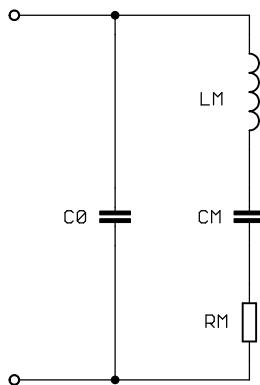
4.3 Tiedonsiirto

Ilmassa langaton tiedonsiirto tapahtuu paljolti sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvan radiotekniikan avulla. Veden alla sen ongelma on nopea vaimeneminen erityisesti hyvin sähköä johtavassa merivedessä. Vaimennus kasvaa taajuuden kasvaessa. Lähteessä [15, p. 149] on tutkittu radioaaltojen käyttöä vedenalaisessa langattomassa anturiverkossa. Tietoa siirrettiin merivedessä 40 m välimatkan yli nopeudella 100 b/s käyttäen VLF-taajuusalueelle (*Very Low Frequency*) sijoittuvaa 3 kHz taajuutta. Radioaaltojen käyttö olisi siis teknisesti mahdollista. Lisäksi edellä mainittu 3 kHz taajuus vaikuttaisi olevan radiotaajuuksien sääntelyn ulkopuolella. Lähteen [47] mukaan radiotaajuusmääräystä sovelletaan yli 9 kHz taajuuksille. Radiotekniikkaa ei kuitenkaan tutkittu tässä työssä enempää.

Tyypillinen tekniikka vedenalaisessa langattomassa tiedonsiirrossa on akustinen tiedonsiirto. Aihetta on tutkittu laajasti erityisesti vedenalaisten langattomien anturiverkkojen näkökulmasta. Esimerkiksi lähteessä [11] on suunniteltu vedenalainen akustinen modeemi ja aihetta on tutkittu kattavasti. Akustinen signaali voidaan lähettää ja vastaanottaa pietsosähköisillä muuntimilla. Tässä työssä käytetään näistä lähinnä termejä ultraäänilähetin ja -vastaanotin riippuen siitä, kummassa roolissa muunninta käytetään.

4.3.1 Pietsosähköinen muunnin

Pietsosähköisellä muuntimella voidaan muuttaa sähköinen signaali akustiseksi ja päinvastoin. Sitä voidaan mallintaa kuvassa 4.3 esitetyllä Butterworth-van Dyke -mallilla. Kuvassa esiintyvä kapasitanssi C_0 on todellinen muuntimen elektrodien välissä oleva kapasitanssi. Sen sijaan L_m , C_m ja R_m muodostavat niin kutsutun mekaanisen haaran ja niiden suuruudet riippuvat pietsoelementin ja sen näkemän akustisen kuorman mekaanisista ominaisuuksista. Sähköisesti ne kuitenkin näyttäytyvät RLC-sarjaresonanssipiirinä. Resistanssissa R_m kulutettu teho koostuu lähetetystä akustisesta tehosta ja resistiivisistä häviöistä. Käytettäessä muunninta vastaanottimena voidaan RLC-piirin kanssa sarjaan ajatella jännitelähde.



Kuva 4.3 Pietsosähköisen muuntimen Butterworth-van Dyke -malli.

Pietsosähköisellä muuntimella on kaksi resonanssitaajuutta: sarja- f_s ja rinnakkaisresonanssitaajuus f_p . Nämä saadaan kaavoilla

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}} \quad \text{ja} \quad (4.11)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m \frac{C_0 C_m}{C_0 + C_m}}}. \quad (4.12)$$

Suurin lähetysteho saavutetaan sarjaresonanssitaajuudella. Rinnakkaisresonanssitaajuudella puolestaan muunnin tuottaa suurimman jännitteen vastaanottimena. Tämän vuoksi tarjolla on lähetin-vastaanotin -pareja (esimerkiksi [5]), joissa lähettimen sarjaresonanssitaajuus on lähellä vastaanottimen rinnakkaisresonanssitaajuutta.

Pietsosähköisen muuntimen hyvyysarvo Q saadaan kaavalla

$$Q = \sqrt{\frac{L_m}{C_m}} \frac{1}{R_m}. \quad (4.13)$$

Hyvyysarvo vaikuttaa muuntimen kaistanleveyteen B , joka määritetään kaavalla

$$B = \frac{f_s}{Q}. \quad (4.14)$$

Kaistanleveys puolestaan vaikuttaa tiedonsiirtonopeuteen ja vastaanotettavan kohinan määrään.

4.3.2 Kantama

Akustisen signaalin suurin mahdollinen kantama voidaan määrittää lähetystehon, vastaanottimen herkkyyden, etenemisvaimennuksen ja signaaliin summautuvan kohinan avulla. Varsinaisesti rajoittava tekijä on kohina, sillä heikkoa signaalia on mahdollista vahvistaa vastaanottimessa. Kuitenkin myös kohina vahvistuu samalla, joten signaalin on erotuttava kohinasta ennen vahvistusta. Siirtotiellä vaikuttavan akustisen kohinan lisäksi kohinassa tulee huomioida myös vastaanottimen sähköinen kohina.

Akustinen siirtotie voidaan esittää passiivisella luotainyhtälöllä (*Passive Sonar Equation*)

$$SNR = SL - TL - NL, \quad (4.15)$$

jossa SNR (*Signal to Noise Ratio*) kertoo signaali-kohinasuhteen vastaanottimella, SL (*Source Level*) on hyötysignaalin äänenpaine tietyllä referenssietäisyydellä lähetimestä, TL (*Transmission Loss*) etenemisvaimennus ja NL (*Noise Level*) kohinan äänenpaine vastaanottimella. Yksikköinä käytetään desibelejä, minkä vuoksi äänenpaineelle tarvitaan jokin referenssitaso, johon painetta verrataan. Vedenalaisissa sovelluksissa referenssitasona käytetään yleensä $1 \mu\text{Pa}$ painetta. Ilmassa käytetään ihmiskorvan kuulokynnystä vastaavaa tasoa $20 \mu\text{Pa}$.

Pistemäisestä lähteestä tuotetun ääniaallon paine on kääntäen verrannollinen suhteessa sen etenemään matkaan.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{R_2}{R_1} \Leftrightarrow p_2 = p_1 \frac{R_1}{R_2}, \quad (4.16)$$

jossa R_1 ja R_2 ovat tarkastelupisteiden etäisyydet lähteestä ja p_1 paine pisteessä R_1 sekä p_2 paine pisteessä R_2 . Edetyn matkan kaksinkertaistuessa paine siis puolittuu, mikä pätee sekä pallomaisesti että keilamaisesti eteneville aalloille. Tämä vaimentuminen tunnetaan leviämis- tai hajaantumisvaimennuksena (*Spreading Loss*) ja sen osalta etenemisvaimennus TL voidaan esittää desibeleinä kaavalla

$$TL = 20 \log \left(\frac{R_2}{R_1} \right). \quad (4.17)$$

Akustinen signaali vaimenee edetessään myös veden absorption vuoksi. Suuri-taajuiset signaalit vaimenevat nopeammin kuin pienitaajuiset ja merivedessä absorptio on voimakkaampaa kuin makeassa vedessä. Kirjallisuudessa on esitetty erilaisia kaavoja, joilla voidaan määrittää absorption aiheuttama vaimennus merivedessä. Niiden alkuperäisiin lähteisiin ei kuitenkaan valitettavasti päästy käsiksi. Lähteessä [11, s. 22–23] esitetään kaava viitaten Ainslien ja McColmin tutkimukseen vuodelta 1998. Tässä ei kuitenkaan kerrottu kaavan sisältämien kertoimien arvoja. Esitetty kaava vaikuttaisi olevan sama kuin lähteessä [32, s. 24–26] esitetty kaava, jonka alkuperäksi mainitaan Francois'n ja Garrisonin tutkimus vuodelta 1982. Sen mukaan absorptiovaimennus α (*Absorption Loss*) saadaan seuraavasti:

$$\alpha = A_1 P_1 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + A_2 P_2 \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2, \quad (4.18)$$

jossa ensimmäinen osa ilmaisee boorihapon ja toinen osa magnesiumsulfaatin vaikutuksen vaimennukseen. Kolmas osa kertoo vaimennuksen puhtaan veden viskositeetista johtuen. Taajuus f ilmaistaan kilohertseinä. Tutkitaan tässä vaimennusta ainoastaan makean veden osalta ja oletetaan puhtaan veden vaimennuksen kuvaavan sitä riittävän hyvin. Kolmannen osan kertoimet ovat:

$$\begin{cases} P_3 &= 1 - 3,83 \times 10^{-5} z + 4,9 \times 10^{-10} z^2 \\ A_3 &= 4,937 \times 10^{-4} - 2,59 \times 10^{-5} T + 9,11 \times 10^{-7} T^2 \\ &\quad - 1,5 \times 10^{-8} T^3, \quad T < 20^\circ C \\ A_3 &= 3,964 \times 10^{-4} - 1,146 \times 10^{-5} T + 1,45 \times 10^{-7} T^2 \\ &\quad - 6,5 \times 10^{-10} T^3, \quad T > 20^\circ C, \end{cases} \quad (4.19)$$

jossa z on syvyys metreinä ja T lämpötila Celsius-asteina. Tulos saadaan yksikössä dB/km.

Etenemisvaimennus voidaan nyt esittää kokonaisuudessaan leviämisen- ja absorptiovaimennuksen summana

$$TL = 20 \log \left(\frac{R_2}{R_1} \right) + \alpha(R_2 - R_1). \quad (4.20)$$

Kaavan (4.18) kolmannen osan avulla vaimennukseksi esimerkiksi 32 kHz taajuudella saatiin noin 0,17–0,51 dB/km eli 0,00017–0,00051 dB/m, kun lämpötila vaihtelee välillä 0–30°C. Vaimennus on suurimmillaan, kun lämpötila on 0°C. Vastaavasti leviämisvaimennus aiheuttaa 50 m matkalla noin 34 dB vaimennuksen, kun vertailuna käytetään 1 m matkaa. Näin ollen absorptioon aiheuttama vaimeneminen alkupään ultraäänitaajuuksilla järvivedessä on merkityksetön leviämisvaimennukseen verrattuna.

Ultraäänilähettimen tuottama äänenpaine suhteessa sille syötettyyn jännitteeseen voidaan määrittää, jos tunnetaan sen lähetysvaste (*TVR*, *Transmitting Voltage Response*). Tämä esitetään desibeleinä suhteessa referenssitasoon tietylle etäisyydelle lähettimestä. Yksikkönä voi siis olla esimerkiksi dB re 1 μPa/V @ 1 m. Tällöin metrin päässä lähettimestä mitattu äänenpaine on *TVR*:n suuruinen suhteessa 1 μPa paineeseen, kun muuntimelle syötetään 1 V_{RMS} jännite. Lähettimen äänenpaineeksi *TVR*:n avulla saadaan siis

$$SL = TVR + 20 \log \left(\frac{V_{in}}{V_{ref}} \right), \quad (4.21)$$

jossa V_{in} on muuntimelle syötetty jännite ja V_{ref} referenssijännite, jolla *TVR* on ilmoitettu. Edellä esitetyssä esimerkissä V_{ref} on siis 1 V_{RMS}. Etäisyys, jolle *TVR* on ilmoitettu, voidaan sijoittaa R_1 :n paikalle kaavassa (4.20).

Vastaavasti ultraäänivastaanottimelle voidaan ilmoittaa sen herkkyys (*RVR*, *Receiving Voltage Response*). Se voidaan esittää esimerkiksi yksikössä dB re V/μPa. *RVR* voidaan ilmaista kaavalla

$$RVR = 20 \log \left(\frac{V_{out}}{1 \mu Pa} \right), \quad (4.22)$$

jossa V_{out} on muuntimen tuottaman jännitteen tehollisarvo (*RMS*, *Root Mean Square*) 1 μPa paineella. Jos kohina jätetään huomioimatta, niin edellä esitettyjen kaavojen perusteella voidaan laskea vastaanotettu jännite seuraavasti:

$$V_{out} = 10^{\left(\frac{SL - TL + RVR}{20} \right)}. \quad (4.23)$$

Kaavan (4.23) avulla voidaan nyt arvioida, kuinka suurta vahvistusta vastaanottimessa tarvitaan, kun tietoa siirretään akustisesti tietyn matkan yli. Lisäksi voidaan arvioida, kuinka suuri vahvistimen sisäänmenoon suhteutettu kohina saa

olla. Jos vastaanotettava signaali sisältää akustista kohinaa hyötysignaalin taajuus-alueella, sille ei voida tehdä enää mitään.

4.3.3 Modulaatio

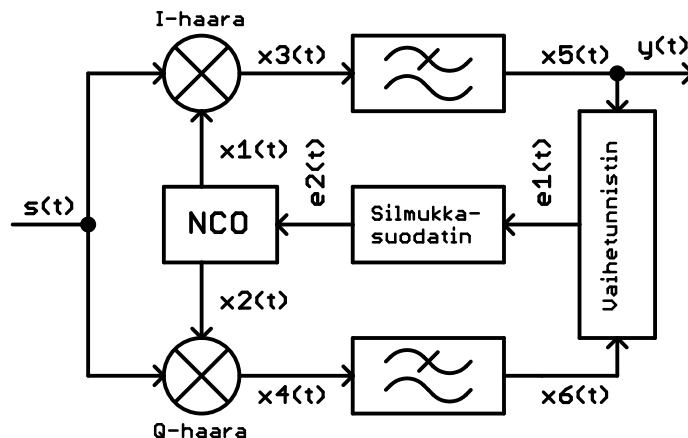
Digitaalisessa tiedonsiirrossa puhutaan yleensä modulaation sijaan avainnuksista. Avainnustekniikoiden perustapaukset ovat ASK, FSK ja PSK eli amplitudi-, taajuus- ja vaiheavainnus. Avainnus voidaan toteuttaa kaksitilaisena, eli binäärisenä, tai monitilaisena. Binäärisessä tapauksessa yksi lähetettävä symboli vastaa yhtä bittiä. M-tilaisessa avainnuksessa yhdellä symbolilla voidaan esittää $\log_2(M)$ bittiä. Monitilaisilla avainnuksilla voidaan kasvattaa tiedonsiirtonopeutta. ASK- ja PSK-avainnuksilla tämä tulee joko bittivirheiden todennäköisyyden kasvun tai suuremman lähetystehon kustannuksella. Monitilaisella FSK:lla puolestaan kasvaa lähettimeltä vaadittava kaistanleveys. Kaikissa tapauksissa modulaattorin ja demodulaattorin toteutukset muodostuvat monimutkaisemmiksi. [46, s. 282–284]

Tässä työssä ei ollut erityistä tarvetta suurelle tiedonsiirtonopeudelle. Pariston tai akun säästämiseksi olisi edullista suorittaa lähetys mahdollisimman nopeasti, mutta modulaatiotekniikan valinta tehtiin kuitenkin binääristen avainnusten kesken. Esiteityistä tekniikoista pienimmän bittivirhesuhteen (*BER*, *Bit Error Ratio*) tarjoaa PSK [49, s. 223]. Tämä on todennettu nimenomaan ultraäänellä tapahtuvan tiedonsiirron kanssa lähteessä [30]. Hyöty tulee kuitenkin monimutkaisemman demodulaattorin kustannuksella. ASK:n demodulaattoriksi riittää yksinkertainen verho-
käyräilmaisun. Binäärinen FSK voidaan ilmaista esimerkiksi kahdella kaistanpäästösuotimella ja niihin liitettyillä verho-
käyräilmaisimilla. PSK vaatii ilmaisimen, jolla päästään käsiksi vastaanotetun signaalin vaiheeseen. Tämä onnistuu esimerkiksi vaihelukitun silmukan (*PLL*, *Phase-Locked Loop*) avulla.

Modulaatiotekniikaksi päätettiin valita PSK sen pienen BER-arvon vuoksi. Binäärisessä PSK-avainnuksessa eli BPSK-avainnuksessa sinimuotoisen kantoaallon vaihetta muutetaan lähetettävän bitin mukaan. Virheilmaisun riski on pienimmillään, kun näiden kahden vaiheen välillä on mahdollisimman suuri ero. Tämä saavutetaan, kun ero on 180° eli π rad. Sovitaan, että 0 rad kulma vastaa 1-bittiä ja π rad kulma 0-bittiä. Asia voidaan ajatella myös niin, että 1-bitin tapauksessa kantoaalto kerrotaan luvulla 1 ja 0-bitin tapauksessa luvulla -1. Hieman yksinkertaisempaan toteutukseen voitaisiin päästä koodaamalla lähetettävä tieto differentiaalisesti eli esimerkiksi lähetettäessä 0-bittiä kantoaallon vaihe muuttuu, mutta säilyy muuttumattomana 1-bittiä lähetettäessä. Tällöin ei ole tarpeen regeneroida kantoaaltoa vaan data voidaan ilmaista kertomalla vastaanotetut näytteet yhden bitin ajan viivästetyllä näytteellä ja alipäästösuodattamalla tulos.

4.3.4 Ilmaisin

BPSK-ilmaisin voidaan toteuttaa esimerkiksi John Costasin 1950-luvulla esittelemään Costasin silmukkaan (*Costas Loop*) [17] pohjautuen. Sillä voidaan samanaikaisesti regeneroida kantaalto ja ilmaista kantataajuinen signaali. Nykyään silmukka voidaan toteuttaa digitaalisesti joko laitteisto- tai ohjelmistototeutuksena. Tarkastellaan digitaalisen Costasin silmukan toimintaa kuvan 4.4 avulla.



Kuva 4.4 Digitaalinen Costasin silmukka.

Digitaalinen Costasin silmukka toimii diskreettiaikaisesti eli kaikki signaalit ovat näytteistettyjä. Seuraavassa analyysissä signaalit on kuitenkin selvyden vuoksi esitetty jatkuva-aikaisina. Eri lähteissä signaalit esitetään monin eri tavoin vaikkakin ne kuvaavat saman toiminnan. Esimerkiksi sisäänmenosignaali voidaan esittää joko sini- tai kosinisignaalina. Tämä analyysi perustuu lähinnä lähteisiin [20] ja [60].

Silmukkaan syötetään BPSK-signaali

$$s(t) = m(t)A_s \cos(\omega_c t), \quad m(t) = \begin{cases} 1 & \text{1-bitti} \\ -1 & \text{0-bitti,} \end{cases} \quad (4.24)$$

jossa A_s on signaalin amplitudi, ω_c kantaallon taajuus ja $m(t)$ moduloiva signaali. Numeerisesti ohjattu oskillaattori (*NCO*, *Numerically Controlled Oscillator*) tuottaa kaksi sinimuotoista signaalia, joilla on $\pi/2$ rad vaihe-ero toisiinsa nähden. NCO:lle siis syötetään numeerinen lukuarvo ja sen tuottama taajuus riippuu tästä arvosta. Toiminta vastaa jänniteohjattua oskillaattoria (*VCO*, *Voltage Controlled Oscillator*).

I- ja Q-haarojen kertojille syötetään signaalit

$$x_1(t) = A_{NCO} \cos(\omega_{NCO}t + \theta) \quad \text{ja} \quad (4.25)$$

$$x_2(t) = A_{NCO} \sin(\omega_{NCO}t + \theta), \quad (4.26)$$

joissa A_{NCO} on oskillaattorin amplitudi, ω_{NCO} sen taajuus ja θ vaihe-ero saapuvan signaalin $s(t)$ ja oskillaattorin ulostulon $x_1(t)$ välillä. Oskillaattorin taajuus ja vaihe-ero ovat ajasta riippuvia signaaleja silmukan pyrkiessä lukittumaan kanta-aaltoon. Kaavojen selventämiseksi tätä ei ole merkitty näkyviin. Vaihe-ero on välillä $-\pi < \theta \leq \pi$.

I- ja Q-haarojen kertojien ulostulot ovat

$$x_3(t) = m(t) \frac{A_s A_{NCO}}{2} \left(\cos((\omega_c + \omega_{NCO})t + \theta) + \cos((\omega_c - \omega_{NCO})t + \theta) \right) \quad (4.27)$$

ja

$$x_4(t) = m(t) \frac{A_s A_{NCO}}{2} \left(\sin((\omega_c + \omega_{NCO})t + \theta) + \sin((\omega_c - \omega_{NCO})t + \theta) \right). \quad (4.28)$$

Näistä taajuuskomponentti $\omega_c + \omega_{NCO}$ poistuu alipäästösuodatuksessa, joten vaihetunnistimeen syötettävät signaalit ovat

$$x_5(t) = m(t) \frac{A_s A_{NCO}}{2} \cos((\omega_c - \omega_{NCO})t + \theta) \quad \text{ja} \quad (4.29)$$

$$x_6(t) = m(t) \frac{A_s A_{NCO}}{2} \sin((\omega_c - \omega_{NCO})t + \theta). \quad (4.30)$$

Vaihetunnistimena voidaan käyttää kertojaa, jolloin

$$e_1(t) = \frac{1}{8} (A_s A_{NCO})^2 \sin(2(\omega_c - \omega_{NCO})t + \theta). \quad (4.31)$$

Kertojan ongelma on vastaanotettavan signaalin ja oskillaattorin amplitudien vaikutus virhesignaaliin $e_1(t)$. Toinen vaihtoehto on laskea arkustangentti signaalien $x_6(t)$ ja $x_5(t)$ osamäärästä:

$$\begin{aligned} e_1(t) &= \arctan \left(\frac{m(t) \frac{A_s A_{NCO}}{2} \sin((\omega_c - \omega_{NCO})t + \theta)}{m(t) \frac{A_s A_{NCO}}{2} \cos((\omega_c - \omega_{NCO})t + \theta)} \right) \\ &= \arctan \left(\frac{\sin((\omega_c - \omega_{NCO})t + \theta)}{\cos((\omega_c - \omega_{NCO})t + \theta)} \right), \end{aligned} \quad (4.32)$$

jolloin amplitudeilla ei ole merkitystä.

Vaihetunnistimen, silmukkasuotimen ja NCO:n muodostaman PLL:n avulla Costasin silmukka pyrkii tilanteeseen, jossa $e_1(t)$ on 0 ja $e_2(t)$ arvossa, joka ylläpitää oskillaattorin taajuden ω_{NCO} samana kuin kantoaallon taajuus ω_c . Tällöin vaihe-ero θ on joko 0 tai π rad ja termit $(\omega_c - \omega_{NCO})t$ häviävät edellä esitetyistä kaavoista.

Kahden eri lukituspuoleen ansiosta silmukka pysyy lukittuna, kun moduloiva signaali $m(t)$ vaihtaa tilaa ja näin ollen lähetetty data on ilmaistavissa. Silmukkasuotimen suunnittelulla voidaan vaikuttaa muun muassa siihen, kuinka nopeasti silmukka lukittuu ja kuinka suuri taajuuksien ω_c ja ω_{NCO} ero voi korkeintaan alkutilanteessa olla, että lukitus on mahdollinen. PLL:n toimintaa ei katsottu tarpeelliseksi avata tämän enempää. Siihen voi tutustua Costasin silmukan kannalta lähteessä [12]. Myöhemmin esiteltävä ohjelmallinen toteutus nojaa pitkälti lähteeseen [28].

Ulostuloksi $y(t)$ saadaan siis

$$y(t) = m(t) \frac{A_s A_{NCO}}{2} \cos(\theta) = \pm m(t) \frac{A_s A_{NCO}}{2}, \quad (4.33)$$

kun silmukka on lukittunut. Näin ollen demoduloitu signaali voi olla invertoitunut riippuen siitä, onko silmukka alunperin lukittunut vaiheeseen 0 vai π rad. Tämä on pystyttävä havaitsemaan vastaanotetusta datasta, jotta se voidaan tulkita oikein.

Edellä esitetyssä analyysissä ei ole huomioitu kohinaa, joka hankaloittaa silmukan toimintaa. Silmukassa olevien suodattimien suunnittelulla voidaan kuitenkin vaikuttaa myös kohinansietoon.

4.3.5 Haasteita akustisessa tiedonsiirrossa veden alla

Vedenalaisessa akustisessa tiedonsiirrossa on useita haasteita, joita on koottu esimerkiksi lähteeseen [7]. Lähteessä aihetta käsitellään vedenalaisten anturi-verkkojen kannalta. Tässä alaluvussa tarkastellaan lähinnä monitie-etenemistä suunniteltavan järjestelmän kannalta. Muita haasteita ovat muun muassa melu ja Doppler-siirtymät akustisen signaalin heijastuessa esimerkiksi aalloista.

Monitie-eteneminen aiheuttaa signaaliin häipymistä ja symbolien välistä häiriötä (*ISI, Intersymbol Interference*). Kun kaksi aaltoa kohtaavat, kyseisessä pisteessä vaikuttaa niiden summa. Tätä kutsutaan interferenssiksi. Vastakkaisessa vaiheessa olevat aallot kumoavat toisiaan, jolloin kyseessä on destruktiivinen interferenssi ja signaali häipyi.

Jos aaltojen vaihe on sama, ne vahvistavat toisiaan. Tällöin puhutaan konstruktiivisesta interferenssistä. Jos kahden etenemisreitien välinen aikaero on selvästi pienempi

kuin symbolin kesto, konstruktiivisesta interferenssistä on hyötyä. Pidemmällä aikaerolla symbolien välinen häiriö voi aiheuttaa ongelmia.

Äänen nopeus vedessä vaihtelee 0–20°C lämpötiloissa välillä 1401–1483 m/s. Merivedessä 20°C lämpötilassa nopeus on 1522 m/s. [58, s. 325.] Näin ollen varsin pieni pituusero kahden eri reitin välillä on ajallisesti pitkä, kun aika suhteutetaan tiedonsiirtonopeuteen. Esimerkiksi 1 kb/s tiedonsiirtonopeudella yhden bitin kesto on 1 ms, mikä vastaa noin 1,5 m matkaa. Akustinen signaali voi heijastua pinnasta, pohjasta tai välivedessä olevista kohteista. Heijastuskerroin Γ väliaineiden rajapinnassa saadaan niiden akustisten ominaisimpedanssien suhteesta seuraavasti:

$$\Gamma = \frac{Z_{s2} - Z_{s1}}{Z_{s2} + Z_{s1}}, \quad (4.34)$$

jossa Z_{s1} on sen väliaineen akustinen ominaisimpedanssi, josta aalto saapuu ja Z_{s2} rajapinnan toisella puolella olevan väliaineen akustinen ominaisimpedanssi. Väliaineen akustinen ominaisimpedanssi Z_s saadaan väliaineen tiheyden ρ ja väliaineessa vallitsevan äänennopeuden v tulona

$$Z_s = \rho v. \quad (4.35)$$

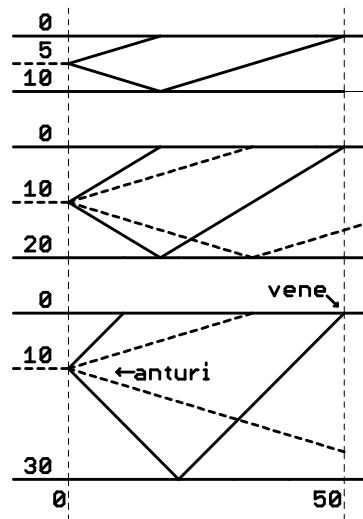
Veden akustinen ominaisimpedanssi on noin 1 500 000 kg/m²s ja ilman noin 410 kg/m²s [58, s. 241]. Näin ollen heijastuskerroin pinnassa on lähes -1 eli heijastuva signaali on lähes samansuuruinen kuin saapuva signaali, mutta sen vaihe on kääntynyt 180°. Pohjasta tapahtuvaan heijastukseen vaikuttaa pohjan materiaali. Karkeasti ottaen kovasta pohjasta tapahtuu vahvempi heijastus kuin pehmeästä.

Tämän työn kannalta heijastuksien vaikutusta voidaan pohtia kahdessa tilanteessa. Kun anturi kiinnitetään takilavajeriin, signaali lähetetään pystysuoraan ylös. Tällöin pinnasta heijastuva aalto etenee vastakkaiseen suuntaan saapuvaan aaltoon nähden ja aallot interferoivat keskenään. Jos matka ultraäänivastaanottimelta pintaan ja takaisin on jokin aallonpituuden λ monikerta ($n\lambda$), aallot kumoavat toisensa vastaanottimen kohdalla lähes täysin. Jos matka on aallonpituuden monikerta lisättynä puolikkaalla ($(n+0,5)\lambda$), aallot summautuvat eli ultraäänivastaanotin havaitsee lähes kaksinkertaisen signaalin. Näin ollen vastaanottimen syvyys vaikuttaa havaittuun signaalin voimakkuuteen. Tätä voidaan mahdollisesti käyttää hyväksi asettamalla vastaanottimen taakse heijastin sopivalle etäisyydelle niin, että konstruktiivinen interferenssi vahvistaa signaalia.

Heijastunut signaali heijastuu uudelleen pohjasta takaisin kohti pintaa. Tässä vaiheessa se on kulkenut kuitenkin vähintään kolminkertaisen matkan alkuperäiseen signaaliin nähden ja sen amplitudi on korkeintaan kolmasosa alkuperäisestä, joten

alkuperäinen signaali on selvästi tätä voimakkaampi. Kolminkertainen matka pätee, kun lähetin on lähellä pohjaa. Matkojen suhde on suurempi lähettimen ollessa lähempänä pintaa. Aikaero alkuperäisen ja pohjasta saapuvan heijastuksen välillä on esimerkiksi 20 m vedessä noin 27 ms.

Siimaan kiinnitetyllä anturilla ja pitkillä siimanpituuksilla tiedonsiirto tapahtuu lähes vaakasuunnassa. Oletettavasti selkävesillä uisteltaessa vaakasuuntaisia heijastuksia ei juurikaan aiheudu rantojen ollessa kaukana. Mahdollisia heijastusten aiheuttajia ovat kuitenkin esimerkiksi jyrkästi pohjasta kohoavat kalliot tai kalaparvet välivedessä. Pohjasta ja pinnasta tapahtuviin heijastuksiin vaikuttavat syvyys ja lähettimen suuntaus sekä lähetyskeilan kulma. Jos syvyys on riittävän suuri ja lähettimen keila riittävän kapea, niin pohjasta saapuvat heijastukset osuvat pintaan vasta veneen etupuolella. Tätä on havainnollistettu kuvassa 4.5.



Kuva 4.5 Lähetyskeilojen leveydet, joilla pohjan heijastukset osuvat veneessä olevaan ultraäänivastaanottoimeen.

Kuvassa esitetään kolme tilannetta, joissa kaikissa anturin ja veneen vaakasuuntainen väli on 50 m. Niihin on piirretty pienin lähetyskeilan kulma, jolla pohjasta saapuva heijastus vastaanotetaan. Ylimmässä tilanteessa veden syvyys on 10 m ja anturi on 5 m syvyydessä. Tällöin pohjasta saapuva heijastus osuu ultraäänivastaanottoimeen, kun lähetyskeilan kulma on noin 33° tai suurempi. Seuraavissa kaavakuvissa anturi on 10 m syvyydessä ja veden syvyydet ovat 20 m ja 30 m. Nähdään, että keilan tulee olla selvästi laajempi, jotta heijastus vastaanotettaisiin. Näihin on piirretty katkoviivalla ylintä tilannetta vastaava keila. Käytännössä pinta ja pohja eivät kuitenkaan ole vaakasuoria viivoja. Pinnalla on aallokkoa ja pohjan muodot vaihtelevat. Näin ollen heijastuksia siroaa moneen suuntaan.

Yksi mahdollisuus ongelmallisille heijastuksille on veneen peräpeili, johon ultraäänivastaanotin on kiinnitetty. Tässäkin voidaan pyrkiä hyödyntämään heijastuksia joko sijoittamalla vastaanotin sopivalle etäisyydelle peräpeilistä tai käyttämällä edellä esitettyä heijastinta, jotta saadaan aikaiseksi konstruktiivinen interferenssi vastaanottimen kohdalle. Muita heijastuksia aiheuttavia tekijöitä voivat olla myös vedenalaiset lämpötilagradientit, joissa veden akustinen ominaisimpedanssi muuttuu. Vene ja moottori aiheuttavat pyörteiden ultraäänivastaanottimen ympäristöön. Näiden vaikutusta vastaanottoon on vaikea arvioida, joten se jää kokeellisesti selvittäväksi.

5. LAITTEISTOSUUNNITTELU

Tässä luvussa esitellään järjestelmää varten suunnitellut kytkennät. Komponenttien valinnat ja mitoitus pyritään käymään kattavasti ja perustellen läpi. Tässä työssä ei kuitenkaan käsitellä suunnittelua piirilevyjen eikä koteloinnin osalta. Suunnitellut kytkennät esitellään sekä anturille että näyttölaitteelle omissa alaluvuissaan.

5.1 Anturi

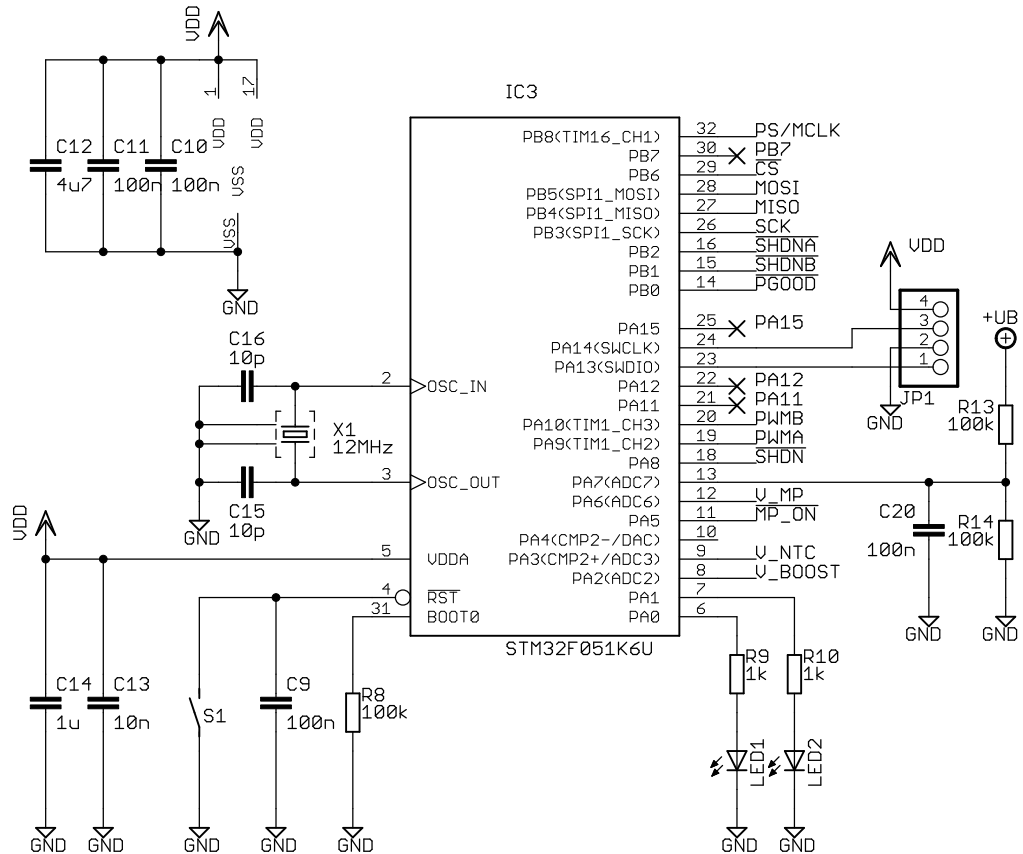
Tässä alaluvussa esitellään siimaan kiinnitettävälle anturille suunniteltu kytkentä. Kytkentä koostuu lohkokasolla mikro-ohjaimesta, ultraäänilähettimestä ja sen ajurista, syvyys- ja lämpötila-anturista sekä teholahteesta. Lisäksi kytkentään suunniteltiin nopeuden mittausta varten vaihtoehtoiset lohkot sekä termistä että Pitot-putkeen perustuvaa mittausta varten. Komponenttivalinnoissa asetettiin mahdollisuuksien mukaan etusijalle pieni koko ja virrankulutus.

5.1.1 Mikro-ohjain

Mikro-ohjaimeksi päätettiin valita STMicroelectronicsin 32-bittinen STM32F051-sarjan mikro-ohjain, josta tekijällä oli entuudestaan kokemusta. Lisäksi käytettävissä oli STM32F0DISCOVERY-kehitysalusta, jolla on kätevä kokeilla uusia kytkentä- ja ohjelmistoideoita kehitystyön aikana. STM32F051 perustuu ARM Cortex-M0-suorittimeen. Alla on listattu sarjassa tarjolla olevien mikro-ohjaimien ominaisuuksia [51].

- Käyttöjännite: 2–3,6 V
- Kellotaajuus: 48 MHz
- Flash-muisti: 16–64 kB
- SRAM-muisti: 8 kB
- 12-bittinen AD-muunnin, enintään 16 kanavaa
- 12-bittinen DA-muunnin
- 2 analogista komparaattoria
- Mallista riippuen enintään 11 ajastinyksikköä
- Saatavilla 32–64 nastaisissa koteloidissa

Tähän työhön sopiva malli on pieneen 32-nastaiseen 5×5 mm QFP-koteloon pakattu STM32F051KxU6. Mallinumeron x voi olla joko 4, 6 tai 8 ja se kertoo flash-muistin määrän (16, 32 tai 64 kB). Oletettavasti jo pienin 16 kB on riittävä. Mikro-ohjain ohjeistuksensa mukaisesti on esitetty kuvassa 5.1. Mikro-ohjaimen porttimerkinnän perään on merkitty sulkuihin, mitä vaihtoehtoista toimintoa signaali käyttää.



Kuva 5.1 STM32F051-mikro-ohjaimen kytkentä ohjeistuksensa mukaisesti.

Kiteenä X_1 käytettiin TXC:n 12 MHz kidettä mallinumeroltaan 7V-12.000MAAV-T. Se on pakattu pieneen $3,2 \times 2,5$ mm pintaliitoskoteloon ja sen kuormakapasitanssi on 8 pF. Kondensaattoreiden C_{15} ja C_{16} sarjakytkentä yhdessä hajakapasitanssien kanssa muodostaa tämän kuorman. Kondensaattoreiden arvoksi päätettiin kokeilla 10 pF kapasitanssia, jolloin hajakapasitanssin oletetaan olevan noin 3 pF. Jos rakennetun prototyyppikytkennän toimintataajuus poikkeaa merkittävästi suunnitellusta, voidaan sitä korjata muuttamalla näiden kondensaattoreiden arvoja.

Nappia S_1 painamalla mikro-ohjain voidaan resetoita. Nappi lisättiin kytkentään lähinnä testausvaihetta silmälläpitäen. Kondensaattori C_9 tarjoaa suojaa \overline{RST} -nastan kytkeytyviä häiriöitä vastaan, jotta mikro-ohjain ei resetoitu näiden vuoksi. Datalehdellä suositeltu arvo on 100 nF [51, s. 76]. \overline{RST} -nastassa on sisäinen ylös-

veto. *BOOT0*-nastaa on kytketty 100 k Ω alasvetovastus, jotta mikro-ohjain käyttää flash-muistia.

Mikro-ohjaimen digitaalinen käyttöjännite V_{DD} suodatetaan kondensaattoreilla C_{10} , C_{11} ja C_{12} . Analogisen käyttöjännitteen V_{DDA} suodatukseen on kondensaattorit C_{13} ja C_{14} . Arvot on valittu datalehden ohjeen mukaan [51, s. 43]. Jos analogisia mittauksia on tarkoitus suorittaa, kun esimerkiksi alaluvussa 5.1.3 esiteltävä hakkurikytkentä on toiminnassa tai muu toiminta aiheuttaa häiriöitä, tulisi analogisen käyttöjännitteen suodatusta parantaa. Tätä ei toistaiseksi suunniteltu pidemmälle.

Mikro-ohjaimen käyttöjännitettä suurempi akkujännite voidaan mitata vastusten R_{13} ja R_{14} muodostamalla jännitteenjakokytkennällä. Virrankulutuksen pienentämiseksi niiden arvoksi valittiin 100 k Ω . Analogisessa tilassa käytettäville sisäänmenoille ilmoitetaan vuotovirraksi enintään $\pm 0,2 \mu\text{A}$ [51, s. 71]. Jännitteenjakokytkennän Thevenin-vastus on 50 k Ω , vuotovirran aiheuttama virhe on enintään 10 mV.

Kondensaattori C_{20} tarjoaa lisäsuodatusta ja toimii pieni-impedanssisena lähteenä AD-muuntimelle. Näytteenoton aikana C_{20} ja näytteenottokondensaattori C_{ADC} kytketään rinnan. Kondensaattorin C_{20} kapasitanssi (100 nF) on huomattavasti suurempi kuin AD-muuntimen näytteenottokondensaattorin kapasitanssi C_{ADC} (8 pF, [51, s. 76]). Näin ollen sen jännite ei juuri laske tai nouse näytteenoton vuoksi riippumatta siitä, kuinka suuri jännite kondensaattorissa C_{ADC} on ennen näytteenottoa. Muunnos voidaan siis suorittaa lyhyellä näytteenottoajalla huolimatta jännitteenjakokytkennän suurehkosta resistanssista. Mittausten välin tulee kuitenkin olla riittävä, että kondensaattorin C_{20} jännite ehtii asettua mittausten välissä. Tarkkuudessa päästään helposti tavoiteltuun 0,1 V tarkkuuteen.

Laitteeseen lisättiin myös ledit LED_1 ja LED_2 sekä 1 k Ω virranrajoitusvastukset R_9 ja R_{10} . Näitä voidaan hyödyntää testausvaiheessa, mutta myöhemminkin niiden avulla voidaan tarjota käyttäjälle tietoa esimerkiksi laitteen havaitessa ongelmia omassa toiminnassaan. Lisäksi kytkennästä löytyy ohjelmointiliitin JP_1 . Mikro-ohjaimen flash-muisti voidaan ohjelmoida *PA13*- ja *PA14*-nastoihin liitettyjä *SWDIO*- ja *SWCLK*-linjoja käyttäen.

Kuvassa näkyvät signaalit *PS/MCLK*, \overline{CS} , *MOSI*, *MISO* ja *SCK* liittyvät alaluvussa 5.1.5 esiteltävään paine- ja lämpötila-anturiin. Signaalit \overline{SHDN} , \overline{SHDNA} , \overline{SHDNB} , \overline{PGOOD} , *PWMA* ja *PWMB* liittyvät alaluvussa 5.1.3 esiteltävään ultraäänilähettimen ajuriin. Sillä voidaan syöttää tehoa myös alaluvussa 5.1.4 esiteltävään termistorikytkentään, jolla on tarkoitus mitata nopeutta. Signaaleilla V_{NTC} ja V_{BOOST} mitataan kyseisen kytkennän jännitteitä. Vaihtoehtoisesti nopeusmittaus

voidaan suorittaa alaluvussa 5.1.6 esiteltävällä differentiaalisella paineanturilla. Tähän liittyvät signaalit $\overline{MP_{ON}}$ ja V_{MP} .

5.1.2 Ultraäänilähetin

Pienikokoisia ultraäänilähettämiä ja -vastaanottimia on tarjolla useille taajuuksille. Tyypillinen taajuus on 40 kHz. Vedenalainen käyttö kuitenkin rajaa vaihtoehtoja. Yksi mahdollisuus on hankkia pietsokeraaminen elementti ja suojata se vedenalaista käyttöä varten, kuten on toimittu lähteessä [11, s. 46]. Suojaavalla materiaalilla voidaan myös parantaa lähettimen akustista sovitusta veteen.

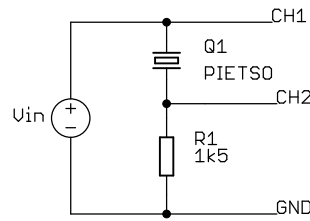
Ebay-nettihuutokaupasta löytyi alumiinikuorin suojattuja ultraäänilähettämiä, joita päätettiin kokeilla. Mallinumeroksi ilmoitettiin ETC1040BH08. Valitettavasti näille ei ollut tarjolla datalehteä. Myynti-ilmoituksessa annettiin tiedot:

- Halkaisija: 10 mm
- Keskitäajuus: 40 kHz
- Lähettimen äänenpaine (10 V): ≥ 117 dB
- Vastaanottimen herkkyys (40 kHz): ≥ -65 dB
- Kapasitanssi: $2400 \text{ pF} \pm 25 \%$
- Maksimijännite: 60 V_{p-p}
- Lähetyskulma: $60^\circ \pm 15^\circ$ (-6 dB)
- Käyttölämpötila: $-20\text{--}70^\circ\text{C}$

Samaa muunninta käytetään sekä lähettämiseen että vastaanottoon. Löydettyjä vaihtoehtoja ovat esimerkiksi Pro-Waven 400ET/R080 [5] ja 400EP125 [4]. Molemmat toimivat 40 kHz taajuudella. Ensin mainittu koostuu erillisistä lähetimestä ja vastaanottimesta, joiden halkaisija on 8 mm. Jälkimmäinen toimii sekä lähettimenä että vastaanottimena. Sen halkaisija on 12,5 mm.

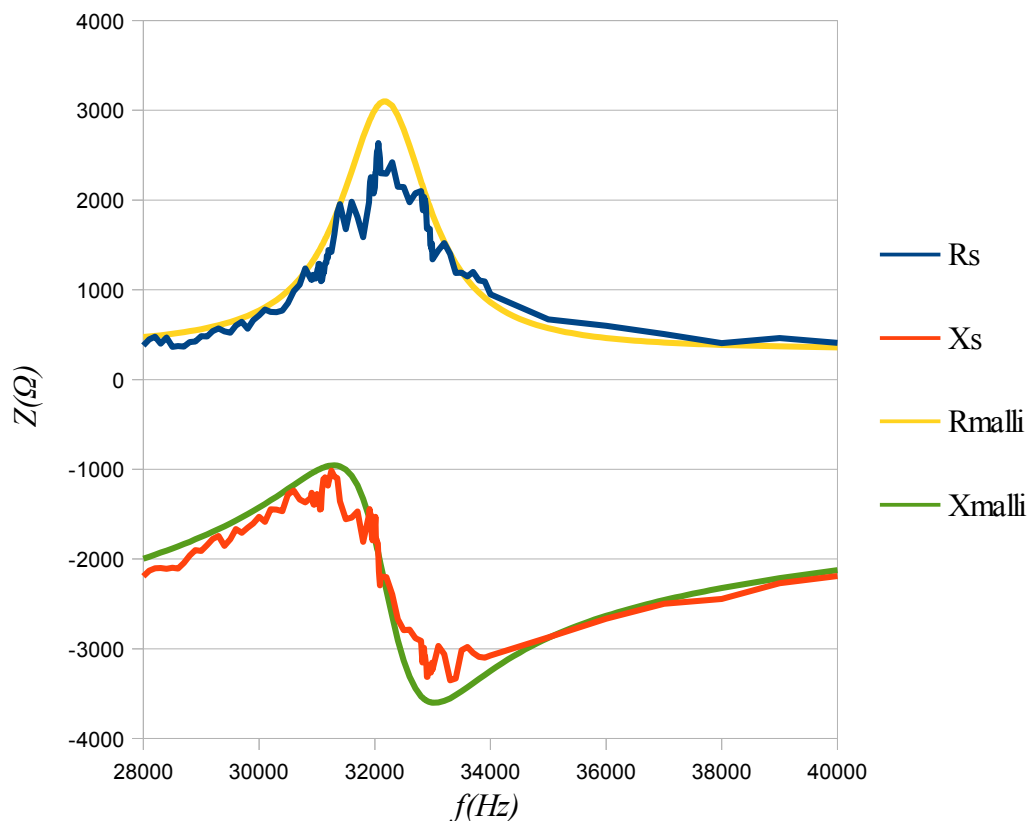
Tiedoissa ei kerrottu äänenpaineen referenssitasoja eikä etäisyyttä, jolta se on mitattu. Myös herkkyyden referenssitaso puuttui. Tyypillisesti vastaavilla lähettimillä, kuten edellisessä kappaleessa mainituilla, ilmoitettu äänenpaineen referenssitaso ilmassa on $20 \text{ } \mu\text{Pa}$ ja mittausetäisyys 30 cm. Tämä on ilmoitettu, kun lähettäintä syötetään 10 V_{RMS} jännitteellä. Vastaanottimien herkkyyden referenssitaso on vastaavasti $1 \text{ V}/\mu\text{bar}$ eli $10 \text{ V}/\text{Pa}$.

Alustavasti muuntimia kokeiltiin veden alla lähettämällä 40 kHz taajuudella. Vastaanotettu signaali oli erittäin heikko. Veden aiheuttama akustinen kuorma poikkeaa kuitenkin ilmasta. Havaittiin, että veden alla paras yhteys saatiin noin 32,25 kHz taajuudella. Pietsosähköisen muuntimen ominaisuuksia määritettiin sittemmin mittaamalla sen impedanssi eri taajuuksilla kuvan 5.2 mukaisella kytkennällä.



Kuva 5.2 Pietsosähköisen muuntimen impedanssin mittauskytkentä.

Pietsosähköisen muuntimen ja vastuksen sarjaankytkennälle syötettiin sini-muotoista noin 4 V jännitettä muuntimen ollessa veden alla noin 50 l muoviastiassa. Oskilloskoopilla mitattiin jännitteet kuvan osoittamista kohdista. Jännitteet ja näiden välinen vaihe-ero luettiin oskilloskoopin näytöltä ja kirjattiin Openoffice Calc-laskentataulukkoon. Taulukon avulla määritettiin muuntimen impedanssi eri taajuuksilla muodossa $R + X$. Lisäksi laskettiin rinnakkaismuunnos $R||X$. Mitatut impedanssin reaali- ja imaginääriosat on esitetty kuvan 5.3 käyrissä R_s ja X_s . Käyrät eivät ole erityisen tasaisia. Syynä voi olla yksinkertaisesti oskilloskoopin avulla suoritettun mittauksen epätarkkuus. Toinen vaihtoehto on pienessä muoviastiassa tapahtuvat kaiut, jotka aiheuttavat epätarkkuutta muuntimen sekä lähettäessä että vastaanottaessa.

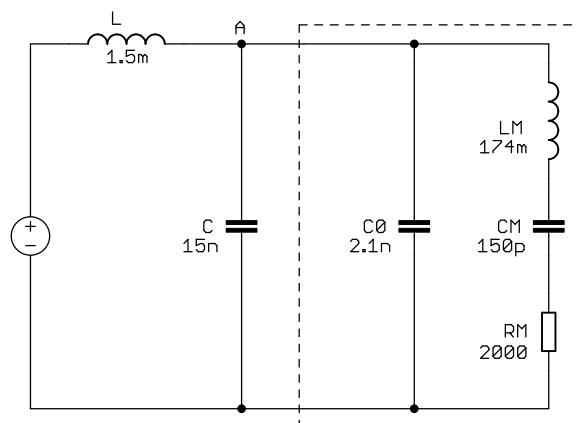


Kuva 5.3 Pietsosähköisen muuntimen mitatut ja mallinnetut impedanssit.

Laskentataulukon arvojen perusteella määritettiin arvot C_0 , C_m , R_m ja L_m . Nämä on esitetty kuvassa 5.4 sivulla 33. Kyseisen mallin avulla lasketut käyrät impedanssin reaali- ja imaginääriosille on esitetty kuvassa 5.3 käyrillä R_{malli} ja X_{malli} . Jotta mallin reaali-osan käyrä saatiin vastaamaan mitattua, tuli malliin lisätä lisäksi sarjaan $330\ \Omega$ vastus. Kyseistä vastusta ei esiinny Butterworth-van Dyke -mallissa. Syytä, miksi mittausten mukaan kyseinen vastus havaittiin, ei kuitenkaan selvitetty tarkemmin.

5.1.3 Ultraäänilähettimen ajuri

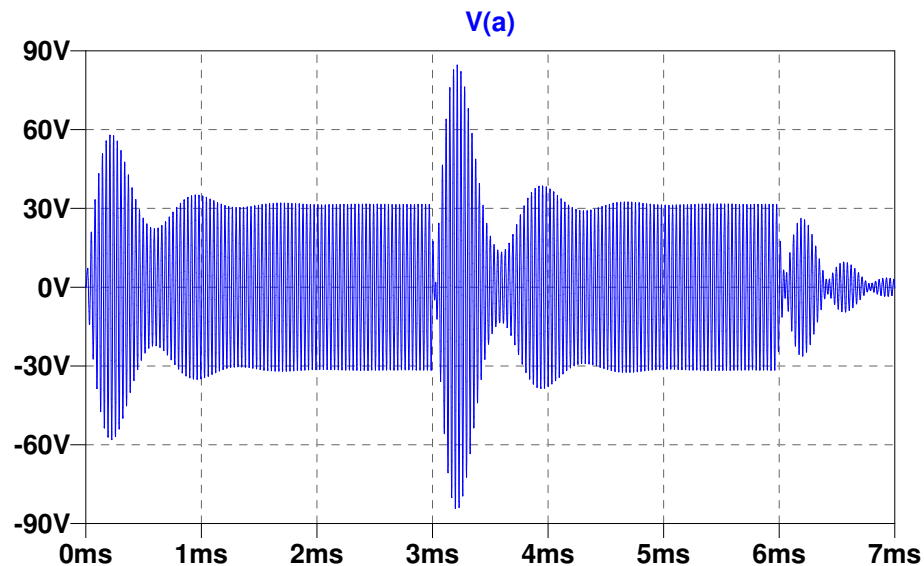
Jotta ultraäänilähetintä voidaan käyttää maksimiteholla, tulee sille syöttää $\pm 30\text{ V}$ jännite. Yksi vaihtoehto on käyttää impedanssisovitusta. Tällöin lähettimen eteen kytketään esimerkiksi kelan ja kondensaattorin muodostama L-sovituspääpiiri, joka on esitetty kuvassa 5.4. L-sovituspääpiiriä voidaan syöttää joko kantti- tai siniaallolla. Tasajännitekään aiheuta ongelmia, sillä kytkennässä ei ole reittiä tasavirrälle. Sovitus voidaan tehdä myös muuntajalla. Molemmissa tapauksissa lähettimelle syötettävä jännite voidaan nostaa halutuksi. Muuntajaan ei kuitenkaan tule syöttää tasajännitettä. L- ja muuntajasovituksia on tutkittu esimerkiksi lähteessä [55].



Kuva 5.4 L-sovituspääpiiri ultraäänilähettimen sarjaresonanssitaajuudelle 31,1 kHz.

L-sovituspääpiirin ongelma on ultraäänilähettimen mekaanisen haaran reaktiivisten osien L_m ja C_m vaikutus sovituksen toimintaan. Näiden ja sovituspääpiirin välillä tapahtuu heijastuksia aina syöttöjännitteen muuttuessa. Tätä on havainnollistettu kuvassa 5.5. Siinä esitetään LTSpice IV -ohjelmalla suoritettu simulaatio, jossa komponenttien arvoina on käytetty kuvassa 5.4 esitettyjä arvoja. Syöttöjännite on $\pm 3,6\text{ V}$ kanttiaalto, jonka vaihe kääntyy 180° noin 3 ms kohdalla. Kuvassa nähdään jännitepiikit muutosten jälkeen, jonka jälkeen jännite asettuu noin $\pm 30\text{ V}$ tasolle.

Sekä sovituskomponenttien L ja C että ultraäänilähettimen arvojen toleranssit vaikuttavat lopputulokseen. Lisäksi sovitus toimii hyvin yhdellä ainoalla taajuudella,



Kuva 5.5 Kuvan 5.4 kytkennän jännite pisteessä A syötettynä $\pm 3,6$ V kanttiaallolla.

joten taajuuden vaihtaminen vaatii todennäköisesti muutoksia laitteistoon. Sopivia muuntajia ei puolestaan löydetty valmiina, joten muuntaja tulisi käämiä itse. Oletettavasti ultraäänilähettimen taajuudella toimivat kela tai muuntaja olisivat fyysisesti suurikokoisempia kuin suuremmalla taajuudella toimivan jännitettä nostavan hakkurin kela. Näin ollen päätettiin, että L-sovituspäiriä tai muuntajaa ei käytetä tässä työssä.

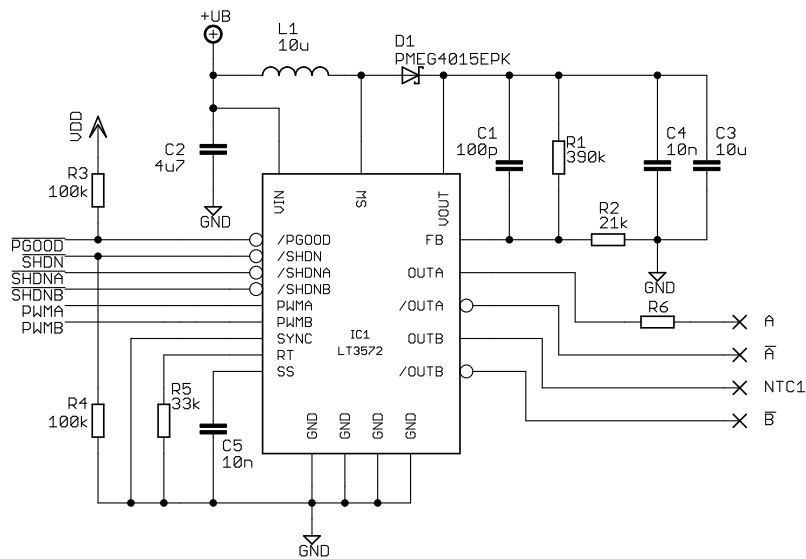
Jännitettä nostetaan siis hakkurilla. Tässäkin tapauksessa syöttöjännite voi olla sini- tai kanttiaaltoa. Sinimuotoinen jännite voidaan tuottaa mikro-ohjaimen DA-muuntimella ja vahvistaa esimerkiksi operaatiovahvistimella, jolla on riittävä virranantokyky ulostuloon. Kanttiaaltoa voidaan syöttää ultraäänilähtetille käyttämällä H-siltaa.

Ultraäänilähettimen ajuriksi löydettiin kuitenkin juuri tähän käyttötarkoitukseen suunniteltu mikropiiri: Linear Technologyn LT3572 [31]. Se tarjoaa edellä esitetyt jännitettä nostavan boost-hakkurin ja kaksi H-siltaa yhdellä mikropiirillä. Näin ollen operaatiovahvistinkyt kentää ei tutkittu tarkemmin. Seuraavassa listassa on esitelty LT3572:n keskeisimpiä ominaisuuksia:

- Käyttöjännite: 2,7–10 V
- Ulostulojännite: ≤ 40 V
- Hakkurin kytkentätaajuus: 500 kHz - 2,25 MHz
- Hakkurin kytkimen maksimivirta: ≥ 900 mA
- Kotelo: 4×4 mm QFN-20

LT3572 kykenee ajamaan kahta 2,2 nF kapasitiivista kuormaa 80 kHz taajuudella ulostulojännitteen ollessa 30 V eli se soveltuu hyvin käytettävän ultraäänilähettimen

ajamiseen noin 32 kHz taajuudella. Lähettimen maksimijännitteeksi oli ilmoitettu ± 30 V, minkä oletettiin koskevan sinimuotoista jännitettä. Kanttiaallon perustaajuuden komponentin amplitudi on $4/\pi$ -kertainen kanttiaallon amplitudiin nähden. Näin ollen LT3572:n ulostulojännitteeksi päätettiin asettaa noin 24 V, sillä tällöin ultraäänilähettimen resistanssin R_m yli vaikuttaa sarjaresonanssitaajuudella noin ± 30 V sinimuotoinen jännite. Taajuuden poiketessa tästä, jännite pienenee. Näin ollen saman lähetystehon saavuttamiseksi lähellä rinnakkaisresonanssitaajuutta tulisi käyttää suurempaa jännitettä. Siihen, voiko ultraäänilähettimelle syötettävää jännitettä turvallisesti nostaa kyseisessä tilanteessa, ei kuitenkaan löydetty vastausta.



Kuva 5.6 LT3572-kytkentä.

Kuvassa 5.6 esitetään suunniteltu kytkentä. Jännitteen takaisinkytkennän vastukset valittiin datalehden [31, s. 8] kaavan

$$R_1 = R_2 \left(\frac{V_{out}}{1,225} - 1 \right) \quad (5.1)$$

avulla. Vastuksen R_2 arvoksi päätettiin muutaman kaavaan kokeillun arvon jälkeen 21 k Ω . Tällöin vastuksen R_1 arvoksi saatiin 390 k Ω . Näillä vastusarvoilla ulostulojännitteeksi V_{out} saadaan 23,975 V. Sisäänmenokondensaattorin C_2 ja kelan L_1 arvoiksi valittiin kuvassa näkyvät arvot datalehden suositusten mukaan.

Ulostulokondensaattorin C_3 arvoksi datalehdellä suositellaan vähintään 4,7 μ F. Tästä ei varmaksi selvinnyt tarkoitetaanko arvolla nimellistä vai todellista arvoa. Keraamisen kondensaattorin kapasitanssi on nimittäin riippuvainen sen yli olevasta jännitteestä [23]. Lähteen mukaan vaikutus pienenee, kun käytetään fyysisesti suurikokoisempia kondensaattoreita. Ulostulokondensaattoriksi päätettiin kokeilla

1210-koteloista 50 V jännitekeston omaavaa $10\ \mu\text{F}$ X7R-kondensaattoria malliltaan CL32B106KBJNWE, joita oli valmiiksi käytettävissä. Tämän todellinen kapasitanssi noin 24 V jännitteellä on noin $3\ \mu\text{F}$ [16]. Jos kyseinen kondensaattori todetaan riittämättömäksi, tulee tilalle etsiä kondensaattori, jonka kapasitanssi kyseisellä jännitteellä on suurempi tai käyttää useampaa kondensaattoria rinnakkain. Ulostulokondensaattorin rinnalle lisättiin $10\ \text{nF}$ kondensaattori C_4 suodattamaan suuri-
taajuisia kytkentähäiriöitä.

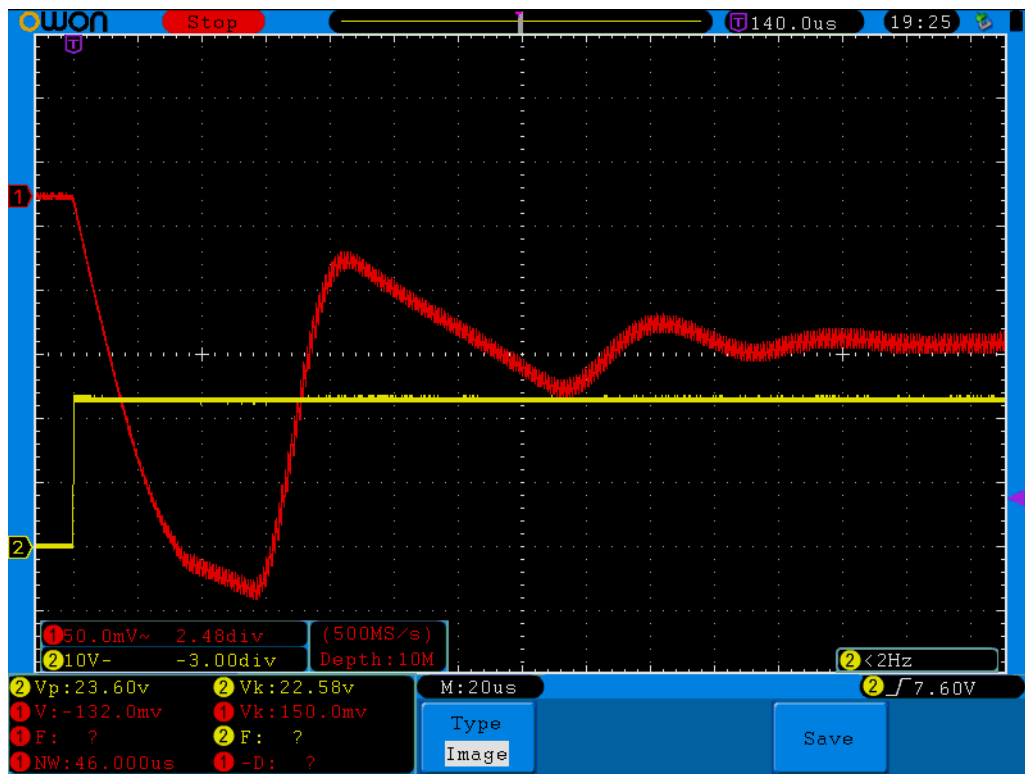
Vastuksella R_5 asetetaan hakkurin kytkentätaajuus. Sen arvoksi valittiin $33\ \text{k}\Omega$, jolloin taajuus on noin $1\ \text{MHz}$. Hakkuri toteuttaa pehmokäynnistyksen, joka rajoittaa syöksyvirtaa hakkurin käynnistyessä. Pehmokäynnistyksen kesto säädetään kondensaattorilla C_5 , jonka arvoksi valittiin datalehdellä esitetty $10\ \text{nF}$.

Diodiksi D_1 valittiin PMEG4015EPK-schottkydiodi. Sen virrankesto on maksimissaan $2,1\ \text{A}$, toipumisaika t_{rr} on nopea $4\ \text{ns}$ ja myötäsuuntainen jännite V_f enintään $480\ \text{mV}$, kun virta on $500\ \text{mA}$. Se on koteloitu pieneen $1,6\times 0,8\ \text{mm}$ pinta-liitoskoteloon. [45]

\overline{PGOOD} -signaali toimii avokollektoriperiaatteella, joten siihen kytkettiin $100\ \text{k}\Omega$ ylösvetovastus R_3 . LT3572 laskee kyseisen linjan alas, kun hakkurin ulostulojännite on noin $95\ \%$ asetetusta jännitteestä. \overline{SHDN} -signaaliin kytkettiin $100\ \text{k}\Omega$ alasvetovastus R_4 . Tällä varmistetaan, että hakkuri pysyy suljettuna, kun mikro-ohjain on lepotilassa ja sen ulostulonastat korkeaimpedanssisessa tilassa. \overline{PGOOD} -signaalin ylösvetoon voitaisiin käyttää myös mikro-ohjaimen sisäistä ylösvetovastusta.

Ultraäänilähetin kytketään ulostulojen A ja \overline{A} välille. Vastusta R_6 ei välttämättä tarvita. Suunnitteluohjeessa [59] ehdotetaan sen lisäämistä, jos lähettimelle kulkevat johdot ovat pitkät. Vastus rajoittaa lähettimen kapasitanssin ja johtojen muodostaman LC-piirin hyvyysarvoa sekä pienentää jännitteen nousunopeutta. Näin ollen vastuksella voidaan rajoittaa ulostulon tilan vaihtuessa syntyviä jännitepiikkejä. Alaluvussa 5.1.4 esiteltävä termistorikytkentä voidaan liittää ulostuloon B .

Myötäkytkentäkondensaattorilla (*Feedforward Capacitor*) C_1 voidaan parantaa hakkurin transienttivastetta. Kuvan 5.6 kytkentää kokeiltiin ensin ilman kondensaattoria C_1 . Puolisillan ulostulon A ja maan välille kytkettiin $1,1\ \text{k}\Omega$ vastus ja *PWMA*-nastan syötettiin kanttiaalto. Hakkurin ulostulon vaihtojännitettä mitattiin oskilloskoopilla, jolloin A :n nousevalla reunalla ulostulojännite näytti kuvan 5.7 mukaiselta.



Kuva 5.7 Hakkurin ulostulojännite kuormatransientissa ilman myötäkytkentäkondensattoria C_1 .

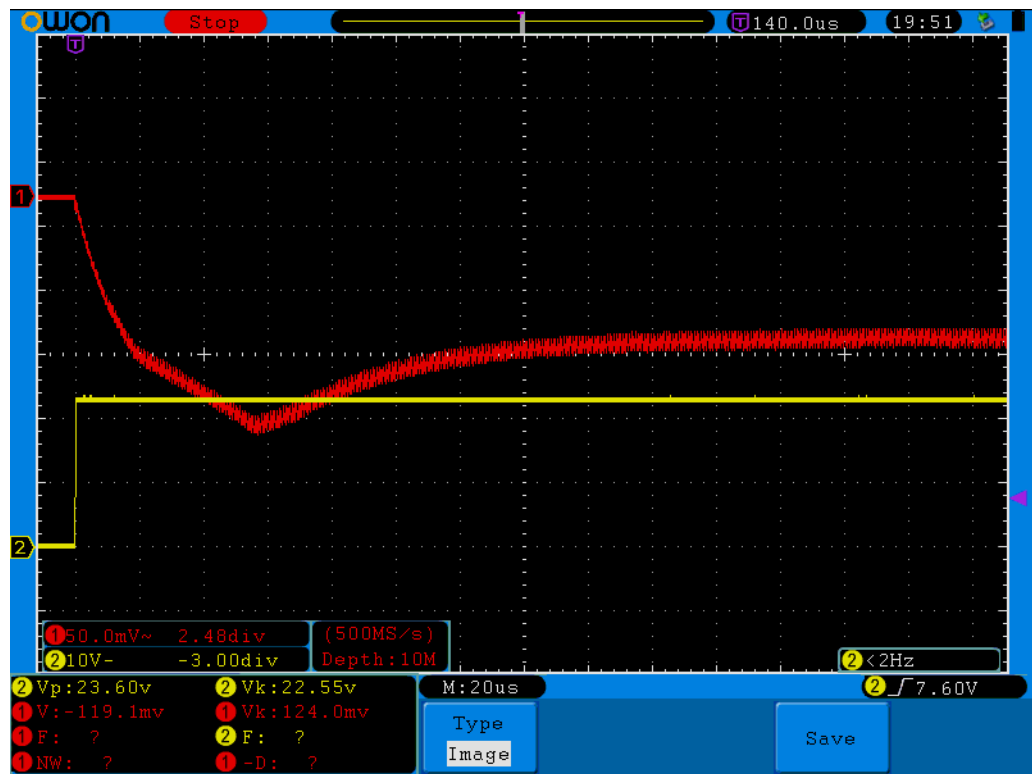
Ensimmäisen suuremman notkahduksen jälkeen ulostulojännite värähtelee noin 16,8 kHz taajuudella. Lähteessä [13, s. 7] esitetyllä kaavalla

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_{noC_1}} \sqrt{\frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \quad (5.2)$$

määritettiin kondensaattorille C_1 optimaalinen arvo. Taajuus f_{noC_1} on edellä esitetty värähtelytaajuus ilman kondensaattoria. Kaavan muuttujat on nimetty lähteestä poiketen kuvaamaan esitetyn kytkennän komponentteja. Kaavan (5.2) avulla kondensaattorin C_1 arvoksi määritettiin 100 pF. Hakkurin ulostulojännite 100 pF kondensaattorin lisäämisen jälkeen on esitetty kuvassa 5.8. Kuvasta nähdään, että ensimmäinen jännitenotkahdus on pienempi eikä värähtelyä ole enää havaittavissa.

5.1.4 Termistorikytkentä nopeusmittaukseen

Perinteisesti termistorianemometrejä on toteutettu operaatiovahvistimilla. Mittaus on kuitenkin mahdollista toteuttaa mikro-ohjaimen avulla. Jo aiemmin mainitussa lähteessä [33] toteutetussa anemometrissa mikro-ohjaimella ohjataan boost-hakkuria muistuttavaa kytkentää, jolla tuotetaan teho termistorin lämmittä-



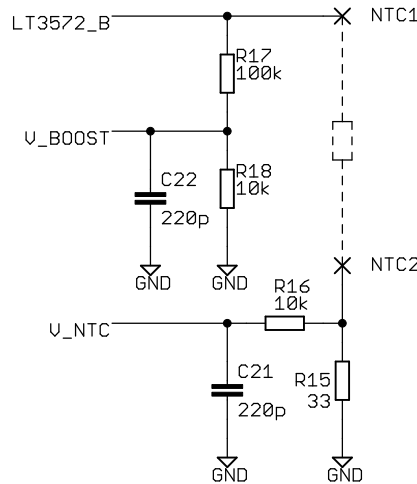
Kuva 5.8 Hakkurin ulostulojännite kuormatransientissa myötäkytkentäkondensaattorin C_1 arvolla 100 pF.

miseen. Lähteessä [61] puolestaan on toteutettu termistorianemometri, jossa mikro-ohjaimella toteutettu PID-säädin (*Proportional-Integral-Derivative*) pitää termistorin ja ympäröivän ilman lämpötilaeron vakiona. Termistorille syötettävää tehoa säädellään PWM-signaalilla (*Pulse-width Modulation*). Lähteessä [26] esitellään myöskin PWM-periaatteella toimiva kuumalanka-anemometri, jossa kuitenkin käytetään apuna komparaattoria. Kun lanka on lämmennyt tavoitelämpötilaan, komparaattori katkaisee tehonsyötön. Tietyllä taajuudella lämmitys kytketään takaisin päälle. Komparaattorin ulostulon pulssinleveydestä voidaan päätellä tehonkulutus. Kun toimintataajuus on riittävän suuri, kuumalanka pysyy lähes vakio-*lämpötilassa*.

Termistoreita hankittiin kolmea eri mallia: 1K2A1 [3], NTCLE100E3102GB0 [44] ja NTCASCWE3102J [43]. Kaikki ovat NTC-vastuksia (*Negative Temperature Coefficient*) eli niiden resistanssi laskee lämpötilan noustessa. Kaikkien nimellinen resistanssi 25°C lämpötilassa on 1 k Ω . Kyseinen resistanssi oletettiin sopivaksi tarjolla olevaan jännitteeseen nähden, jotta voidaan tuottaa sopiva lämmitysteho mittausta varten. Termistorit eroavat toisistaan koon ja ulkomuodon osalta. 1K2A1 on halkaisijaltaan 2,4 mm pyöreähkö epoksilla eristetty termistori. NTCLE100E3102GB0 on hieman litteämmän muotoinen suurimman halkaisijan ollessa noin 3,3 mm. Sen pinta on lakattu, mutta lakkauksen ei luvata toimivan

varsinaisesti eristeenä, mikä voi olla ongelma veden alla. NTCASCWE3102J-termistorilla on puolestaan kuusikulmainen metallinen kuori, jonka päässä on M4-kierteen omaava kiinnityspultti eli se olisi helposti kiinnitettävissä prototyyppiin. Sen kokonaismitat ovat noin $14,7 \times 9$ mm, kun liitosjalkoja ei huomioida.

Tässä työssä teho termistorille voidaan syöttää LT3572-piirin avulla. Tätä varten suunniteltiin kuvassa 5.9 esitetty kytkentä. LT3572:n ulostulo *OUTB* syöttää kahta jännitteenjakokytkentää. Toiseen on kytketty NTC-termistori ja 33Ω vastus R_{15} . Tutkittavien termistoreiden resistanssi on pienimmillään noin 300Ω , kun ne lämmitetään reiluun 50°C lämpötilaan. Kun LT3572:n ulostulojännite on 24 V, mikro-ohjaimelle syötettävä jännite V_{NTC} on tällöin enintään noin 2,4 V. Jos jatkuva jännite vastuksen R_{15} yli on kyseinen 2,4 V, sen tehonkulutus on noin 175 mW. Normaalisti jännite on toki pienempi, mutta varmuuden vuoksi päätettiin käyttää 250 mW tehonkeston omaavaa vastusta. Jännitteenjakokytkennän perään lisättiin vastuksen R_{16} ja kondensaattorin C_{21} muodostama alipäästösuodin.



Kuva 5.9 Termistorikytkentä.

Suotimeen lisättiin vastus, joka rajoittaa mikro-ohjaimen sisäänmenoon syötettävää virtaa, jos termistori esimerkiksi ylikuumenee jostain syystä. Tällöin vastuksen R_{15} yli oleva jännite voi nousta mikro-ohjaimen analogista käyttöjännitettä suuremmaksi, jolloin mikro-ohjaimen ESD-suojadiodien (*Electrostatic Discharge*) läpi kulkee virta. Virta saa olla enintään 5 mA [51, s. 46]. Suotimen rajataajuudeksi suunniteltiin alustavasti noin 100 kHz, joka vähentää hieman hakkurin noin 1 MHz taajuudella aiheuttamaa häiriötä. Se mahdollistaa kuitenkin mittauksen lyhyilläkin pulssinleveyksillä. Datalehden kaavaa [51, s. 77] mukaillen voidaan määrittää aika, joka kuluu jännitteen nousuun puolikkaan AD-muuntimen portaan päähän lopullisesta arvosta. Aika t saadaan kaavalla

$$t = RC \ln(2^{N+1}), \quad (5.3)$$

jossa N on AD-muuntimen bittisyys, tässä tapauksessa 12. Resistanssi R muodostuu puolestaan jännitteenjakokytkennän Thevenin-muunnoksen ja vastuksen R_{16} resistanssista eli se on noin 10 k Ω . Kapasitanssi C on kondensaattorin C_{21} kapasitanssi. Tällöin ajaksi t saadaan noin 20 μ s. Kaavan 5.3 ilmoittama aika on suurin mahdollinen, joka toteutuu, kun jännitepulssi on AD-muuntimen referenssi-jännitteen suuruinen. Käytännössä siis nousuaika on edellä mainittua lyhyempi.

Toisella, vastusten R_{17} ja R_{18} muodostamalla jännitteenjakokytkennällä, voidaan mitata ulostulojännitettä. Tämän avulla voidaan oletettavasti päästä tarkempaan mittaustulokseen kuin olettamalla jännite tunnetuksi mikro-ohjaimen ohjelmistossa. Kondensaattori C_{22} toimii yhdessä vastusten kanssa alipäästösuotimena. Raja-taajuudeksi asetettiin sama noin 100 kHz.

V_{NTC} kytkettiin mikro-ohjaimen nasaan *PA3*, joka toimii sekä AD-muuntimen sisäänmenona että analogisen komparaattorin *CMP2* positiivisena sisäänmenona. Molemmat voivat olla toiminnassa yhtä aikaa. Komparaattoria voidaan käyttää joko vastaavalla periaatteella kuin lähteessä [26] tai sitten se voi toimia ainoastaan turvana ylijännitteiden varalta. Komparaattori voidaan asettaa ajamaan signaali *PWMB* alas jännitteen noustessa normaalitoimintaa suuremmaksi.

Tutkittujen termistorien resistanssi on suurimmillaan noin 2,9 k Ω lämpötilan ollessa 0°C. Tämä rajaa suurimman mahdollisen lämmitystehon arvoksi noin 200 mW. Tämä on maksimiteho, jota voidaan käyttää vakiotehomittauksessa, jotta mittaus toimii suunnitellulla lämpötila-alueella. Tosin, jos kyseinen teho nostaa termistorin lämpötilaa 25°C veden lämpötilaa suuremmaksi, niin tulee käyttää pienempää tehoa. Kyseisellä lämpötilaerolla kuplien muodostuminen termistorin pintaan voi aiheuttaa ongelmia, kuten kerrottiin sivulla 16. Resistanssin aiheuttama tehorojoitus voi koitua ongelmaksi myös vakiolämpötilamittauksessa, jos lämpötilaa ei sen vuoksi voida nostaa haluttuun arvoon.

5.1.5 Syvyys- ja lämpötilamittaus

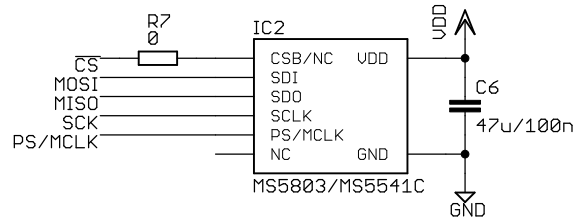
Syvyysanturin valinta oli varsin selkeä. Measurement Specialtiesilta on saatavissa vedenalaisia sovelluksia varten suunniteltuja MS5541- ja MS5803-sarjojen integroituja paine- ja lämpötila-antureita. Lämpötilan mittaus onnistuu siis samalla anturilla. Anturi on suojattu ruostumattomalla teräsrenkaalla, joka on täytetty silikoni-geelillä. Tähän työhön hankittiin molempia antureita, koska aluksi ei ollut saatavilla parempana vaihtoehtona pidettyä MS5803-mallia. Hankitut anturit ovat maksimissaan 14 bar eli 1,4 MPa paineelle suunniteltuja versioita. Näin ollen niillä voidaan mitata syvyyttä noin 130 m asti. MS5803-anturia on saatavilla myös 5 ja 7 bar versioina, jotka nekin riittäisivät noin 40 m ja 60 m syvyyksiin.

Seuraavaksi esitellään MS5541C-anturin ominaisuudet datalehden [41] pohjalta. Anturi on kooltaan $6,4 \times 6,2 \times 2,9$ mm. Se tarjoaa 120 Pa resoluution, joka vastaa noin 1,2 cm syvyyttä, ja tarkkuudeksi luvataan ± 2 kPa paineen ollessa välillä 0–500 kPa ja lämpötilan välillä 0–40°C. Annettu tarkkuus vastaa noin 20 cm tarkkuutta syvyydessä. Lämpötila on mitattavissa 0,01°C resoluutiolla ja tarkkuus 20°C lämpötilassa on $\pm 0,8^\circ\text{C}$. Datalehden sivulla 7 olevan käyrän perusteella tarkkuus on samaa luokkaa välillä 0–30°C.

Anturi toimii 2,2–3,6 V jännitteellä ja sen keskimääräinen virrankulutus on tyypillisesti 4 μA , kun suoritetaan yksi mittausta joka sekunti. Standby-tilassa kulutus on enintään 0,1 μA . Ainoa tarvittava oheiskomponentti on käyttöjännitteen suodatuskondensaattori, joksi suositellaan 47 μF tantaalikondensaattoria. Anturille tulee AD-muunnoksen aikana syöttää 30–35 kHz kellosignaali. Sen kanssa kommunikoidaan väylällä, joka muistuttaa SPI-väylää (*Serial Peripheral Interface*), ja jonka kello-taajuus on maksimissaan 500 kHz. Anturille on tallennettu kalibrointitiedot, joiden avulla tarkat lämpötila- ja painetulokset voidaan laskea.

Vastaavat tiedot etsittiin myös MS5803-14BA-anturin datalehdeltä [42]. Mitoiltaan se vastaa MS5541C-anturia. Paineen mittauksessa sillä voidaan saavuttaa jopa 20 Pa eli noin 2 mm resoluutio. Lämpötilan resoluutio on jopa 0,002°C. Tarkkuudet paineen ja lämpötilan mittauksissa ovat vastaavat kuin MS5541C:n tapauksessa. Käyttöjännitealue on hieman laajempi: 1,8–3,6 V. Keskimääräinen virrankulutus on 12,5 μA , kun mittaukset suoritetaan edellä esitetyillä resoluutioilla kerran sekunnissa. Standby-tilan virrankulutus on enintään 0,14 μA . Käyttöjännitteen suodattamiseen suositellaan 100 nF kondensaattoria. MS5803-anturin kanssa kommunikoidaan joko SPI- tai I²C-väylällä (*Inter-integrated Circuit*). SPI-väylän kello-taajuus voi olla 20 MHz ja I²C-väylän 400 kHz. Sille ei tarvitse syöttää kellosignaalia AD-muunnosta varten. Lämpötila- ja painetulokset lasketaan vastaavasti tallennettujen kalibrointitietojen avulla.

Edellä esiteltyjen ominaisuuksien perusteella molemmat anturit täyttävät asetetut vaatimukset. MS5803-anturilla voi halutessaan mitata tietoja paremmalla resoluutiolla. Lisäksi sen väylävaihtoehdot ovat helpompia käyttää eikä se tarvitse erillistä kellosignaalia. Näin ollen MS5803-anturia pidettiin parempana vaihtoehtona. Kuvassa 5.10 on esitetty kytkentä, jossa voidaan käyttää joko MS5541- tai MS5803-anturia liitettynä SPI-väylään. R_7 on syytä jättää asentamatta, jos käytetään MS5541-anturia, sillä sen NC-nastat tulee jättää kytkemättä tai kytkeä käyttöjännitteeseen.



Kuva 5.10 MS5541C- tai MS5803-14BA-anturin kytkentä.

5.1.6 Paineanturi nopeusmittaukseen

Alaluvussa 4.2.2 esitellyn Pitot-putken toteuttamiseksi tarvitaan differentiaalinen paineanturi, jolla voidaan mitata paine-eroa vähintään alueella 150–1000 Pa. Paine-mittauksen resoluutio voi olla korkeintaan 15 Pa, joka on painelukemien ero 2,0 ja 2,1 km/h nopeuksien välillä. Haasteeksi sopivan anturin löytämiseksi koitui vaatimus, että anturi toimii veden alla. Lähteessä [38] on käytetty vedenalaisessa Pitot-putkessa DP86L-anturia, jonka mittausalue on 1 psi eli noin 6,9 kPa. Kyseinen anturi on täytetty silikoniöljyllä ja sen mittausaukot on suojattu ruostumattomasta teräksestä valmistetuilla kalvoilla, joten vedenalainen käyttö ei aiheuta ongelmia. Valitettavasti DP86-sarjan antureiden hintaluokka on yli 200 euroa, joten niitä ei tutkittu enempää. Näin ollen päätettiin tutkia ilmassa toimivia paineantureita ja pyrkiä suojaamaan ne vedenalaista käyttöä varten.

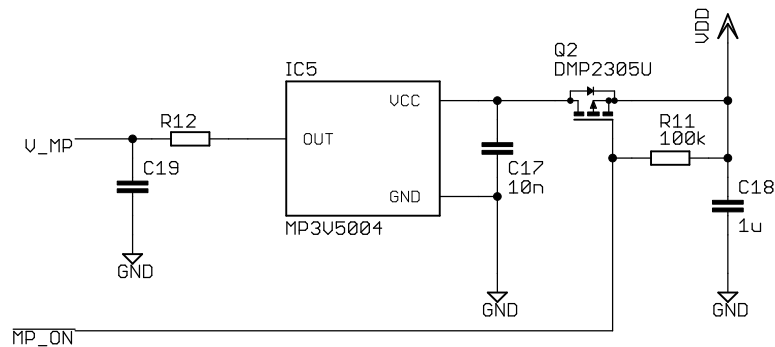
Ilmassa tapahtuvaan mittaukseen suunniteltuja differentiaalisia paineantureita, joilla voidaan mitata esitetyllä painealueella ovat esimerkiksi NXP:n MP3V5004 ja Measurement Specialtiesin MS5525. Datalahden [40] mukaan MS5525-anturia on saatavana useille mittausalueille, joista pienin on 1 psi eli noin 6,9 kPa. Mittauksen resoluutio on 0,0001 psi eli noin 0,69 Pa. MS5525 on digitaalisen ulostulon tarjoava anturi, joka vastaa käyttöjännitteiltään, virrankulutukseltaan ja väylävaihtoehdoiltaan lähes täysin edellä esitettyä MS5803-anturia.

MS5525-anturin painemittauksen tarkkuudeksi 25°C lämpötilassa ilmoitetaan $\pm 0,25$ % suurimmasta arvosta eli noin ± 17 Pa. Suurin mahdollinen virhe (*TEB*, *Total Error Band*) on kuitenkin $\pm 2,5$ %, kun lämpötila vaihtelee välillä 0–85°C. Tämä vastaa jo ± 172 Pa virhettä. Esimerkiksi 2 km/h nopeudella kyseisen paineen lisäys vastaisi noin 2,9 km/h nopeutta, mikä ylittää selvästi asetetut tavoitteet. Oletettavasti maksimivirhe alueella 0–30°C on kuitenkin tätä pienempi, mutta datalehdeltä ei löydy esimerkiksi käyriä tätä selventämään. Kooltaan kahdella letku-liittimellä varustettu kotelo on 12,5×10,3×9,7 mm.

Datalahden [39] mukaan MP3V5004-anturilla voidaan mitata 0–3,92 kPa paine-ero. Se toimii 2,7–3,3 V jännitteellä ja tarjoaa analogisen ulostulon, jonka herkkyys

on tyypillisesti 0,6 V/kPa. Näin ollen käytettäessä 3 V referenssijännitettä 12-bittisellä AD-muuntimella voidaan mitata noin 1,2 Pa resoluutiolla. Anturin virrankulutus on enintään 10 mA. Kahdella letkuliittimellä varustetun kotelon koko on 17,8×18,9×9,9 mm, mikä on varsin suuri tämän sovelluksen kannalta.

MP3V5004-anturin tarkkuudeksi luvataan $\pm 1,5$ % suurimmasta arvosta eli noin ± 59 Pa. Tämä pätee, kun paine on 0–1 kPa ja lämpötila 10–60°C. Nopeudella 2 km/h kyseinen paineen lisäys muuttaisi tulokseksi 2,4 km/h mutta 3 km/h nopeudella lisäys on enää 0,2 km/h. Näin ollen liikutaan aivan asetetun tavoitteen rajoilla. Tämä tarkkuus kuitenkin vaatii, että anturin offset-jännite on mitattu ja tämä tulos vähennetään saadusta mittaustuloksesta. Offset-jännitteellä tarkoitetaan anturin ulostulojännitettä, kun paine-ero on nolla. Lämpötilaero kyseisen ”nollauksen” ja mittauksen välillä saa olla enintään $\pm 5^\circ\text{C}$, mikä voi koitua käytännössä ongelmaksi. Ajatellaan, että offset-jännite mitataan veneessä ennen upotusta. Jos anturi on ollut vaikkapa auringonpaisteessa ja se upotetaan 10-asteiseen veteen, niin lämpötilaero voi olla hyvinkin kymmeniä asteita. Toki anturin ulostulo ilman paine-eroa voitaisiin mitata etukäteen useassa eri lämpötilassa. Näistä mittauksista saadut kalibrointitiedot voitaisiin tallentaa mikro-ohjaimelle ja käyttää niitä apuna nopeuden määrittämisessä.



Kuva 5.11 MP3V5004-anturin kytkentä.

MP3V5004-paineantureita päätettiin kokeilla käytännössä. Datalehden [39] ja valmistajan sovellusohjeen [48] pohjalta suunniteltiin kuvassa 5.11 esitetty kytkentä. Käyttöjännitteen suodatuskondensaattorien C_{17} ja C_{18} arvot valittiin datalehden mukaan. Koska ilmoitettu 10 mA virrankulutus on varsin suuri, kytkentään lisättiin P-tyypin MOSFET (*Metal-oxide-semiconductor Field-effect Transistor*) malliltaan DMP2305U. Sen avulla MP3V5004-anturille voidaan kytkeä virta ainoastaan silloin, kun mittaus suoritetaan ja näin keskimääräinen virrankulutus jää pienemmäksi. Datalehden [18] mukaan DMP2305U-MOSFETin kanavavastuksen $R_{DS(ON)}$ arvo on enintään 90 m Ω , kun hilajännite V_{GS} on -2,5 V. Näin ollen 10 mA virralla

jännitehäviö on enintään 0,9 mV. Se vastaa noin yhtä porrasta 12-bittisen AD-muuntimen ulostulossa, kun referenssijännite on 3 V. Anturin ulostuloon on lisätty komponenttien R_{12} ja C_{19} muodostama RC-alipäästösuodin. Tämän mitoittaminen tehdään, jos suodin katsotaan tarpeelliseksi. Vaihtoehto on ohjelmallinen suodin.

5.1.7 Teholähde

Koska tavoitteena oli mahdollisimman pienikokoinen anturi, päätettiin käyttää yhtä noin AA- tai AAA-kokoista akkua tai paristoa. Yksi vaihtoehto oli alkaliparisto tai NiMH-akku (*Nickel-metal Hydride*), joita yhteneväisen jännitealueen vuoksi voitaisiin käyttää ristiin. Toinen vaihtoehto oli litiumioniakku, jonka koot 10440 ja 14500 vastaavat AAA- ja AA-kokoja. Alkaliparistojen ja NiMH-akkujen etuna voidaan pitää niiden parempaa saatavuutta. Niiden pienen jännitteen vuoksi vaadittaisiin boost-hakkuri, jolla voidaan tuottaa noin 3 V käyttöjännite. Litiumioniakkujen jännite on tätä suurempi, nimellisesti noin 3,6 V. Tätä voidaan laskea lineaarisella regulaattorilla, mikä todennäköisesti onnistuu fyysisesti pienemmällä kytkennällä. Oletettavasti suurin virrantarve on LT3572-kytkennällä, jolla ohjataan ultraäänilähetintä ja mahdollisesti termistoria. Tämän virran osalta hyötysuhde on huonompi tapauksessa, jossa käytetään kahta boost-hakkuria peräkkäin. Litiumioniakkuun se voidaan kytkeä suoraan ilman regulaattoria. Edellä esitetyt seikat huomioiden akkuna päätettiin käyttää litiumioniakkua.

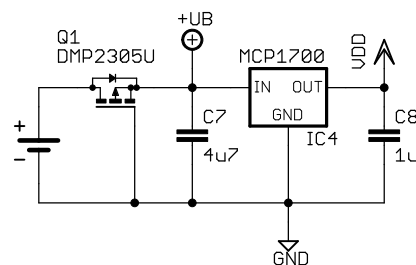
Yleisesti tarjolla olevien litiumioniakkujen käytettävissä oleva jännitealue on välillä 3–4,2 V. Akku voidaan siis olettaa tyhjäksi, kun sen jännite on noin 3 V. Litiumioniakkua ei ole syytä purkaa tämän enempää, sillä akku voi vaurioitua, jos varaus laskee toistuvasti liian alas. [35, s. 8–9] Monissa saatavilla olevissa litiumioniakuissa on valmiina suojapiiri, joka irrottaa akun kuormasta, kun jännite laskee alle asetetun rajan. Pienimmissä 10440-kokoisissa akuissa näitä on kuitenkin harvemmin tarjolla. Näin ollen tämä päätettiin toteuttaa asettamalla mikro-ohjain lepotilaan, kun akkujännite on 3 V. Tällöin virrankulutus laskee hyvin pieneksi.

Akkujen kapasiteetti vaihtelee valmistajasta ja akun koosta riippuen. Tarkastellaan esimerkiksi Keppower Technologyn 10440- ja 14500-kokoisia litiumioniakkuja. 14500-koon akulle luvataan 750 mAh kapasiteetti [2] ja 10440-koon akulle 350 mAh [1]. Tällöin tavoitellun 5 h toiminta-ajan saavuttamiseksi virrankulutus voi olla 14500-koon akulla enintään 150 mA ja 10440-koon akulla 70 mA. Jos toiminta-ajaksi halutaan 12 h, virrankulutus voi olla enintään 62 mA tai 29 mA. Akkujen nimellisjännitteeksi on ilmoitettu 3,7 V, joten 29 mA virrallakin keskimääräinen tehonkulutus saisi olla noin 100 mW.

Koska täyden litiumioniakun jännite ylittää käytettyjen komponenttien jännitekeston, tarvitaan jänniteregulaattori. Regulaattoriksi päätettiin valita Microchip Technologyn lineaarinen MCP1700-regulaattori, jonka ulostulojännite on 2,8 V. Tämä jännite sopii kaikille käytettäville komponenteille. LT3572-kytkennälle syötetään kuitenkin akkujännite ilman regulointia. Regulaattorin koteloksi valittiin tilaasäästävä SOT-23.

MCP1700-regulaattorin ominaisuuksiin perehdyttiin datalehden [34] pohjalta. Sen hyvä ominaisuus akkukäyttöisen laitteen kannalta on pieni tyhjäkäyntivirta I_q , jonka tyypilliseksi arvoksi ilmoitetaan $1,6 \mu\text{A}$ ja maksimiarvoksi $4 \mu\text{A}$. Normaalissa toiminnassa tämän sovelluksen virrankulutus on oletettavasti huomattavasti suurempi, joten tästä on etua lähinnä siirryttäessä lepotilaan akun säästämiseksi. MCP1700-regulaattorin maksimiulostulovirta on 250 mA, jolloin sen dropout-jännite, eli ero sisäänmeno- ja ulostulojännitteiden välillä, on tyypillisesti 178 mV. Näin suurta virtaa ei kuitenkaan tarvita. Datalehden sivulla 6 olevan kuvaajan mukaan esimerkiksi 25 mA virralla dropout-jännite on ainoastaan noin 25 mV. Näin ollen litiumioniakun tarjoama jännitealue on hyvin käytettävissä.

Vaihdettavan akun kanssa on aina vaarana, että käyttäjä asentaa sen laitteeseen väärinpäin. Näin ollen sisäänmenoon lisättiin suojakytkentä tämän varalle. Suojaus toteutettiin samalla P-tyypin MOSFETilla, malliltaan DMP2305U, kuin MP3V5004-anturin käyttöjännitteen kytkentä. Sen kanavaresistanssi on enintään $90 \text{ m}\Omega$, joten MOSFETin aiheuttama jännitehäviö on varsin pieni verrattuna esimerkiksi diodilla toteutettuun suojaukseen. Teholähteen kytkentä on esitetty kuvassa 5.12. Edellä esitettyjen komponenttien lisäksi kuvassa näkyy kondensaattorit C_7 ja C_8 , joiden tarkoitus on suodattaa häiriöitä ja taata regulaattorin stabiilius. Piirilevyllä ne tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle regulaattoria.



Kuva 5.12 Teholähteen kytkentä.

5.2 Näyttölaite ja vastaanotin

Tämän työn puitteissa ei suunniteltu lopullista näyttölaitetta. Testausta varten STMicroelectronicsin STM32F4DISCOVERY-kokeilualustan ympärille koottiin

laitteisto, johon kuului HD44780-yhteensopiva 1602A-näyttö ja ultraäänisignaalin vastaanottamista varten suunniteltu vahvistin- ja suodinmoduuli. Ultraääni-vastaanottimena käytettiin samaa pietsosähköistä muunninta kuin lähettimenäkin. Muunnin on esitelty sivulla 31. Käytännön sovelluksen näyttölaitteen vaatimuksia ja toteutusvaihtoehtoja kuitenkin mietittiin alustavasti. Näitä esitellään luvussa 8.

5.2.1 STM32F4DISCOVERY-kokeilualusta

STM32F4DISCOVERY-kokeilualustalla on STM32F407VGT6-mikro-ohjain, minkä ominaisuuksia ovat muun muassa [54]:

- ARM Cortex-M4 -suoritin
- Käyttöjännite: 1,8–3,6 V
- Kellotaajuus: 168 MHz
- Flash-muisti: 1024 kB
- SRAM-muisti: 192 kB + 4 kB backup SRAM
- 3 12-bittistä AD-muunninta, 16 kanavaa
- 2 12-bittistä DA-muunninta
- 17 ajastinyksikköä
- 100-nastainen LQFP-kotelo

STM32F407VGT6-mikro-ohjaimella on riittävästi laskentatehoa, jotta PSK-signaali voidaan demoduloida reaaliaikaisesti, mikä käsitellään luvussa 6. Laskentatehoa parantaa suuren kellotaajuuden lisäksi mikro-ohjaimella oleva liukulukuyksikkö. Sinänsä kyseisessä mikro-ohjaimessa on tarpeettoman paljon flash- ja SRAM-muistia sekä liitännästoja ja jo yksi AD-muunnin olisi riittävä. DA-muuntimet todettiin hyödyllisiksi testausvaiheessa, sillä niiden avulla oli kätevä tuottaa tietoa demodulaattorin toiminnasta oskilloskoopilla mitattavaan muotoon. Lopullisessa sovelluksessa niille ei liene tarvetta.

Oletettavasti näyttölaitteeseen riittäisi hieman yksinkertaisempi mikro-ohjain kuten STM32F302K8U6, jonka ominaisuuksia ovat muun muassa [53]:

- ARM Cortex-M4 -suoritin
- Käyttöjännite: 2–3,6 V
- Kellotaajuus: 72 MHz
- Flash-muisti: 64 kB
- SRAM-muisti: 16 kB
- 12-bittinen AD-muunnin, 8 kanavaa
- 12-bittinen DA-muunnin
- 8,2 MHz operaatiovahvistin
- 9 ajastinyksikköä
- 32-nastainen 5×5 mm UFQFPN-kotelo

5.2.2 Näyttö

Työssä käytettiin 1602A-näyttöä, joka on HD44780-yhteensopiva LCD-näyttö. Kyseinen näyttö oli tekijällä valmiiksi käytettävissä. Se tarjoaa kaksi riviä, joilla molemmilla voidaan esittää 16 merkkiä. Näytön valmistajasta ei ole varmuutta eikä selkeästi kyseistä näyttöä kuvaavaa datalehteä löydetty. Näin ollen se kytkettiin yleisten periaatteiden mukaisesti. Näyttöä päätettiin käyttää 4-bittisessä tilassa, joten sen datalinjan ylimmät bitit $D_7...D_4$ kytkettiin mikro-ohjaimen C -portin alimpiin bitteihin $PC_3...PC_0$. Datalinjan alimmat bitit $D_3...D_0$ jätettiin kellumaan. Ohjaussignaalit kytkettiin seuraavasti: E nastaan PC_6 , RW nastaan PC_5 ja RS nastaan PC_4 .

Näyttö on 3,3 V käyttöjännitteelle suunniteltu versio ja sen piirilevyllä on varauspumppukytkentä, joka tuottaa LCD:lle negatiivisen jännitteen. Kontrastinsäätönasta V_O jätettiin kelluvaksi. Näyttö oli luettavissa testatuissa noin 5–25°C lämpötiloissa. Laajemman käyttölämpötila-alueen varmistamiseksi kontrastinsäätönastan jännite tulisi olla säädettävissä. Käyttöjännitteenä käytettiin STM32F4DISCOVERYn tarjoamaa 3 V jännitettä, jolla näyttö toimi ongelmitta. Näytön taustavalo kytkettiin myös kyseiseen 3 V jännitteeseen.

5.2.3 Vahvistin- ja suodinkytkentä

Alustavissa testeissä järviolosuhteissa ultraäänivastaanottimen ulostulojännitteeksi mitattiin noin 3 mV_{p-p} luokkaa oleva jännite, kun noin 30 m päästä lähetettiin jatkuvaa 32,25 kHz taajuista signaalia. Lähetintä syötettiin sinimuotoisella jännitteellä, jonka amplitudi oli 20 V. Tämän perusteella aluksi suunniteltiin vahvistin, joka vahvistaa signaalin noin 1000-kertaiseksi. Myöhemmissä testeissä kuitenkin kyseisen vahvistimen ulostuloon saatiin ainoastaan 400 mV_{p-p} jännite samalta matkalta. Tällöin lähetintä syötettiin ±24 V kanttiaallolla ja lähetteenä oli 48-bitin pituinen PSK-signaali 1 kb/s nopeudella. Ensimmäiset testit suoritettiin noin 1 m syvyisessä vedessä rannan läheisyydessä jään alla, myöhemmät testit puolestaan syvässä avovedessä. Matalassa vedessä jatkuvalla signaalilla vastaanotettu taso voi olla suurempi heijastusten aiheuttaman konstruktiivisen interferenssin vuoksi. Todennäköisin selitys kuitenkin on, että mittaukseen käytetty oskilloskoopin mittapää oli lipsahtanut 1×-asentoon ja oskilloskoopin asetuksista puolestaan oli valittu 10×-mittapää. Tällöin saatu tulos oli kymmenkertainen todelliseen nähden. Näin ollen vahvistimesta suunniteltiin kaksi versiota, joista toisen vahvistus on 1000 ja toisen 5000.

Vahvistin toteuttaa samalla myös kaistanpäästösuodatuksen. Ultraäänivastaanottimen ulostulojännitettä mitattiin oskilloskoopilla liikkuvassa veneessä vastaan-

ottimen ollessa veden alla veneen sivulla. Jännitteessä havaittiin muutamien millivolttien luokkaa olevia häiriöitä alle 10 kHz taajuudella. Nämä johtuivat esimerkiksi kolauksista aaltojen osuessa veneen kylkeen. Paikallaan olevasta veneestä mitattiin 200 kHz taajuudella toimivan kaikuluotaimen aiheuttama noin 3 mV_{p-p} jännite, kun vastaanotin oli suunnattu pohjaa kohden noin 20 m syvyisessä vedessä. Nämä pyrittiin huomioimaan suodatusta suunniteltaessa. Näiden häiriöiden eston lisäksi kaistanpäästösuoitin vähentää kohinaa. Suotimen ulostulossa näkyvä kohina on sitä pienempi mitä kapeampikaistainen suodin on. Tällä on merkitystä lähinnä kytkennän tuottaman sähköisen kohinan kannalta. Ultraäänivastaanotin itsessään on varsin kapeakaistainen, mikä vähentää sen vastaanottamaa akustista kohinaa.

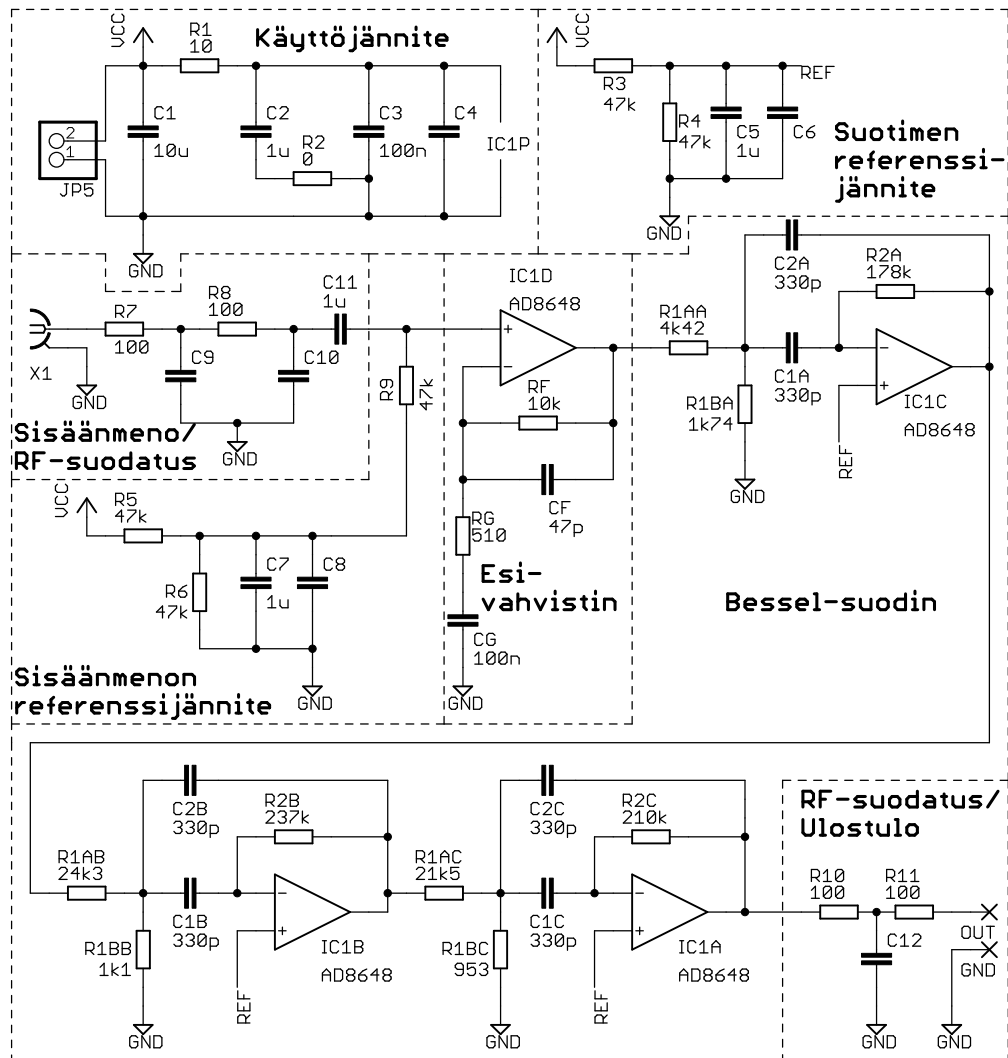
Suodin suunniteltiin niin, että sen keskitäajuus f_0 on 32,25 kHz. Tiedonsiirto BPSK-avainnutuksella 1 kb/s tiedonsiirtonopeudella vaatii vähintään 1 kHz kaistanleveyden. Suotimen kaistanleveydeksi B päätettiin kuitenkin noin 4 kHz eli suotimen hyvyysarvoksi Q muodostuu 8. Tällöin ensinnäkin suotimen hieman suurempi kaistanleveys tarjoaa pelivaraa sen varalle, että komponenttien epäideaalisuuksien vuoksi toteutetun suotimen keskitäajuus poikkeaa suunnitellusta. Lisäksi suotimen hyvyysarvoa ei haluttu asettaa tämän suuremmaksi, sillä suotimen suurempi hyvyysarvo kasvattaa operaatiovahvistimelta vaadittavaa yksikkövahvistuksen raja-taajuutta f_t (*Unity Gain Bandwidth*). Jos käytetyn operaatiovahvistimen raja-taajuus ei ole riittävä, toteutetun suotimen hyvyysarvo on suurempi ja keskitäajuus pienempi kuin oli suunniteltu. Tämä on kerrottu lähteessä [24, s. 291], jossa tiedon viitataan olevan alunperin Budakin teoksesta *Passive and Active Network Analysis and Synthesis*. Sama asia voidaan esittää kaavalla

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} \cong -\frac{\Delta Q}{Q} \cong -\frac{Q f_0}{f_t}, \quad Q f_0 \ll f_t. \quad (5.4)$$

Erilaisia suodinvaihtoehtoja vertailtiin alustavasti käyttäen apuna muun muassa Analog Devicesin Filter Wizard -työkalua [9]. Suodin päätettiin lopulta toteuttaa kuudennen asteen Bessel-suotimena. Tällöin alle 10 kHz ja yli 100 kHz taajuudet vaimenevat yli 70 dB eli niitä ei vahvisteta juuri ollenkaan edes suotimella, jonka vahvistus on 5000 (noin 74 dB).

Yleisimmistä suodinapproksimaatioista Butterworth- ja Chebyshev-suotimilla olisi saavutettavissa parempi vaimennus estokaistalla eli taajuuksilla, jotka halutaan suodattaa pois. Bessel-suotimen transienttivaste on puolestaan parempi kuin edellä mainituilla. Käytännössä esimerkiksi BPSK-signaalin vaihemuutosten yhteydessä Bessel-suotimen ulostulo ei piikitä lainkaan. Suotimen toteutus tapahtuu operaatiovahvistimilla kolmella toisen asteen loholla. Näiden lohkojen hyvyysarvot muodostuvat pienemmiksi kuin Butterworth- tai Chebyshev-suotimilla. Tämä voidaan laskea Bessel-suotimen eduksi, kun huomioidaan edellä esitetyt seikat.

Vahvistimen sisäänmenoimpedanssin sopivaksi suuruudeksi arvioitiin noin 50 k Ω . Tämän aiheuttama kuormitus ultraäänivastaanottimelle on riittävän pieni, jotta sen ulostulojännite ei laske. Suurempaan impedanssiin puolestaan kytkeytyy herkemmin häiriöitä. Sopivan impedanssin saavuttaminen suodinlohkoilla vaikutti hankalalta, joten suotimen eteen kytkettiin esivahvistin. Esivahvistin päätettiin toteuttaa ei-invertoivalla operaatiovahvistinkytkennällä, jonka sisäänmenoimpedanssi on periaatteessa ääretön. Sopiva sisäänmenoimpedanssi voitiin näin asettaa kytkemällä sisäänmenoon sopivankokoinen, tässä tapauksessa 47 k Ω , vastus. Suodinlohkot päätettiin toteuttaa *multiple feedback*-rakenteina. Kytkentä on esitetty kuvassa 5.13. Myös esivahvistin toimii laajan kaistanleveyden omaavana kaistanpäästösuotimenä. Sen alarajataajuudeksi valittiin noin 3 kHz ja ylärajataajuudeksi noin 300 kHz. Nämä valitaan kondensaattoreiden C_f ja C_g arvoilla. Kuvassa esitetyillä komponenttiarvoilla toteutetaan suodin, jonka kokonaisvahvistus on 5000.



Kuva 5.13 Ultraäänivastaanottimen vahvistin- ja suodinkytkentä.

Kuvassa eri lohkoja on eroteltu selvyyden vuoksi katkoviivoilla. Sisäänmenossa on SMA-liitin (*Subminiature version A*), johon ultraäänivastaanottimen ulostulo voidaan tuoda koaksiaalikaapelia myöten. Näin pystytään vähentämään signaaliin kytkeytyviä häiriöitä. Ensimmäisissä testeissä hieman erilaisella vahvistinkytkennällä havaittiin GSM-puhelun (*Global System for Mobile Communications*) häiritsevän pahasti vastaanottoa. Häiriön vähentämiseksi vahvistimen sisäänmenoon suunniteltiin vastuksista R_7 ja R_8 sekä kondensaattoreista C_9 ja C_{10} koostuvat suotimet. Vastusten arvoiksi valittiin $100\ \Omega$, joiden vaikutus sisäänmenosignaaliin on pieni. Lähteessä [8] on käsitelty aihetta audiovahvistimen kannalta. Siinä kondensaattorien tyypillisiksi arvoiksi kerrotaan 10–39 pF. Edullisin valinta on kondensaattori, jonka resonanssitaajuus parasiittisen sarjainduktanssin kanssa osuu juuri suodatettavalle taajuudelle. Eli 900 MHz taajuudelle valinta on alueen yläpäässä ja 1800 MHz taajuudelle alapäässä. Sarjainduktanssiin vaikuttaa myös piirilevy-suunnittelu. Kondensaattorien vaikutusta päätettiin kokeilla rakennetulle prototyypille. Tulokset on esitetty sivulla 76.

Lopullisessa sovelluksessa yksi vaihtoehto häiriöiden edelleen vähentämiseksi olisi toteuttaa vahvistin- ja suodinkytkentä vedenpitävään koteloon lähelle ultraäänivastaanotinta. GSM-taajuudet oletettavasti vaimenevat vedessä hyvin lyhyellä matkalla. Lisäksi pidempi siirto kaapelia myöten voitaisiin tehdä vahvistetulle signaalille, jolloin häiriöiden vaikutus olisi senkin vuoksi pienempi.

Ulostulosta signaali viedään kahdella johdolla mikro-ohjainlevylle. Myös näiden johtojen kautta voi kytkeytyä häiriöitä, joten ulostuloon ennen johtoja lisättiin vastusten R_{10} ja R_{11} sekä kondensaattorin C_{12} muodostama suodin. R_{10} erottaa operaatiovahvistimen ulostulon kondensaattorista C_{12} , jotta kapasitiivinen kuorma ei aiheuta epästabiiliutta. Vastuksien arvoksi asetettiin jälleen $100\ \Omega$. Vastusten sijaan voitaisiin käyttää myös ferriittihelmiä. Nämä ovat induktiivisia matalilla taajuuksilla ja resistiivisiä suuremmilla. Tällöin tulisi varmistaa, ettei ferriittien ja kondensaattoreiden välille muodostu LC-resonansseja ainakaan Bessel-suotimen päästökaistalla.

Levyllä tuotava käyttöjännite suodatetaan ensin $10\ \mu\text{F}$ raakasuo datuskondensaattorilla C_1 . Tämän jälkeen lisäsuodatuksena toimii vastuksen R_1 ja kondensaattorien C_2 ja C_3 muodostama RC-suodin. Vastuksen arvoksi asetettiin $10\ \Omega$, jolloin sen aiheuttama jännitehäviö esimerkiksi 20 mA virralla on 200 mV. Tämä pienentää ulostulon kautta mikro-ohjaimen AD-muuntimelle syötettävää jännitealuetta jonkin verran, mutta kohinan pysyessä maltillisena siitä ei uskottu koituvan haittaa. Pienemmällä jännitehäviöllä selvittäisiin käyttämällä vastuksen sijaan ferriittihelmeä. Tätä varten kondensaattorin C_2 kanssa sarjaan on lisätty vastus R_2 , joka tässä tapauksessa oikosuljettiin. Vastuksen R_2 tarkoitus on

vaimentaa kytkennässä syntyviä LC-resonansseja [19, s. 10]. Kondensaattoria C_4 ei toistaiseksi kytketty.

Vastusten R_5 ja R_6 muodostama jännitteenjakokytkentä tuottaa esivahvistimen sisäänmenoon referenssijännitteen, jonka suuruus on puolet käyttöjännitteestä. Kytkentäkondensaattori C_{11} estää tasavirran kulun. Vaihtovirralla kondensaattorien C_{11} ja C_7 impedanssi on hyvin pieni, joten sille sisäänmenoimpedanssina toimii vastus R_9 , kuten jo edellä mainittiin. Ultraäänivastaanottimen tuottama vaihtojännite näkyy nyt referenssijännitetason ympärillä. Kytkentäkondensaattoria C_{11} ei itseasiassa tarvita, kun sisäänmenoon on liitetty ultraäänivastaanotin. Sen kautta ei ole tasavirtareittiä maahan, kuten kuvasta 4.3 sivulla 17 nähdään. Näin ollen kondensaattorilla C_7 on merkitystä lähinnä testausvaiheessa, jossa voidaan käyttää muita jännitelähteitä. Kondensaattori C_8 suunniteltiin kytkentään varmuuden vuoksi. Jos referenssijännitteessä ilmenee häiriöitä suurilla taajuuksilla, joilla kondensaattorin C_7 suodatusteho on heikentynyt parasiittisen sarja-induktanssin vuoksi, voidaan sen rinnalle lisätä pienempi kondensaattori.

Vastukset R_3 ja R_4 sekä kondensaattorit C_5 ja C_6 tuottavat referenssijännitteen suotimen operaatiovahvistimille aivan samalla tavalla kuin edellisen kappaleen kytkentä. Sisäänmenon ja myöhempien asteiden referenssijännitteet päätettiin kuitenkin tuottaa eri kytkennöillä. Koska kondensaattorin C_7 impedanssi ei ole nolla, sisäänmenon referenssijännitteessä näkyy vaimentunut versio sisäänmenojännitteestä, jota ei haluttu kytkeä myöhempien asteiden referenssijännitteeseen.

Useasta peräkkäisestä lohkosta koostuvan vahvistin- ja suodinkytken ulostulossa näkyvää kohinaa voidaan pienentää asettamalla alkupään lohkoille, erityisesti ensimmäiselle, mahdollisimman suuri vahvistus. Ensimmäisen lohkon sisäänmenossa näkyvää kohinaa vahvistetaan joka tapauksessa vahvistimen kokonaisvahvistuksen verran. Myöhemmissä lohkoissa syntyvää kohinaa puolestaan vahvistetaan sitä vähemmän mitä suurempi on edeltävien lohkojen vahvistus. Kohinaa syntyy sekä vastuksissa että puolijohteissa.

Vastuksessa syntyvän lämpökohinan V_n tehollisarvo voidaan esittää kaavalla

$$V_n = \sqrt{4k_B T R B}, \quad (5.5)$$

jossa k_B on Boltzmannin vakio suuruudeltaan noin $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K, T lämpötila Kelvin-asteina, R resistanssi ja B kohinakaistanleveys. B :n paikalle ei voida sijoittaa vahvistin- ja suodinkytken päästökaistan leveyttä suoraan vaan tässä tulee käyttää ekvivalenttia kohinakaistanleveyttä (*NEB*, *Noise-equivalent Bandwidth*), jotka toki riippuvat toisistaan. Ekvivalentin kohinakaistanleveyden määrittämistä

suunniteltavalle kytkennälle ei katsottu tarpeelliseksi vaan kohinaa arvioitiin simulaation avulla.

Oletetaan, että lämpötilaan ei voida vaikuttaa. Lisäksi kytkennän kaistanleveys on jo päätetty. Tällöin kaavan (5.5) perusteella kohinaa voidaan pienentää käyttämällä kytkennässä mahdollisimman pieniresistanssisia vastuksia. Tässä täytyy kuitenkin pyrkiä kompromissiin tehonkulutuksen suhteen. Lisäksi, kuten edellä todettiin, alkupään asteilla on suurempi merkitys kokonaiskohinaan. Jos jokin yksittäinen kohinalähde aiheuttaa selvästi muita suurempaa kohinaa, niin tällöin muiden kohinalähteiden merkitys pienenee. Puolihohteissa syntyvään kohinaan voidaan tässä tapauksessa vaikuttaa lähinnä operaatiovahvistimien valinnalla.

Bessel-suotimen kolmelle toisen asteen lohkolle saatiin seuraavat suunnittelu-parametrit, kun Bessel-suunnittelutaulukon [62, s. 8.48] kolmannen asteen alipäästö-suodin muunnettiin [62, s. 8.56–8.59] kuudennen asteen kaistanpäästösuotimeksi:

- 1. lohko:
 - Q : 6,03
 - f_0 : 32,25 kHz
- 2. lohko:
 - Q : 7,63
 - f_0 : 30,29 kHz
 - Vahvistus: 1,38
- 3. lohko:
 - Q : 7,63
 - f_0 : 34,34 kHz
 - Vahvistus: 1,38
- Kokonaisuus:
 - Q : 8
 - f_0 : 32,25 kHz

Tässä listassa suotimen kokonaisvahvistus on yksi. Toiselle ja kolmannelle lohkolle ilmoitetut vahvistukset pätevät kyseisten lohkojen keskitaajuuudella. Niiden vahvistus koko suotimen keskitaajuuudella on tällöin yksi. Kokonaisvahvistus voidaan jakaa lohkojen kesken mielivaltaisesti, mutta kohinan suhteen se kannattaa keskittää alkupäähän, kuten edellä on kerrottu.

Kuten kuvasta 5.13 nähdään, jokaiseen lohkoon tarvitaan kaksi kondensaattoria ja kolme vastusta. Kun molempien kondensaattorien arvoksi valitaan sama kapa-

sitanssi C , vastusten arvot voidaan laskea seuraavilla kaavoilla [24, s. 142]:

$$R_{1A} = \frac{Q}{H_0 2\pi f_0 C} \quad (5.6)$$

$$R_{1B} = \frac{R_{1A}}{\frac{2Q^2}{H_0} - 1} \quad (5.7)$$

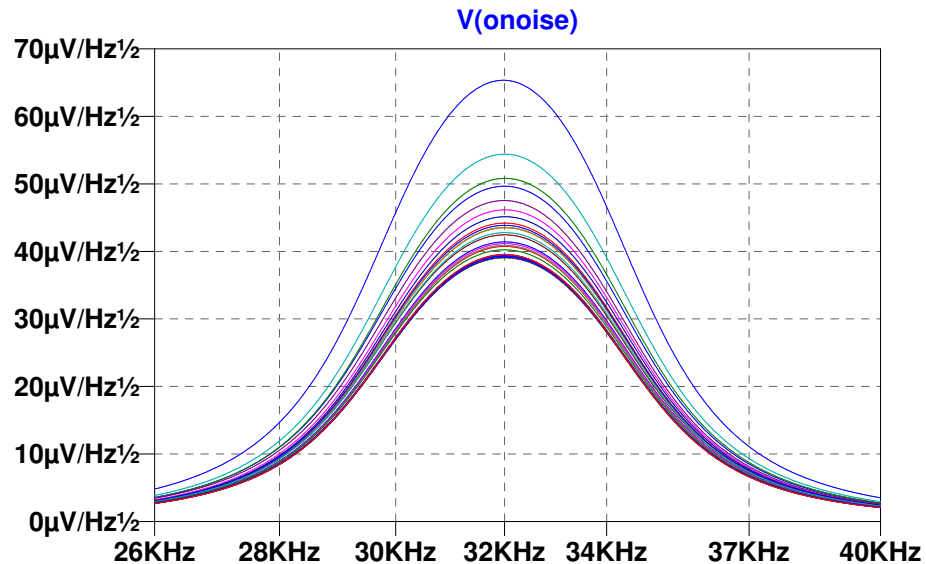
$$R_2 = \frac{2Q}{2\pi f_0 C}. \quad (5.8)$$

Kaavoissa esiintyvä H_0 on vahvistus lohkon keskitaaajuudella f_0 ja Q kyseisen lohkon hyvyysarvo.

Jotta toteutettu suodin vastaa suunniteltua, päätettiin komponentteina käyttää 1 % toleranssin omaavia vastuksia ja kondensaattoreita. Kondensaattoreina päätettiin käyttää C0G-tyypin kondensaattoreita, joiden kapasitanssi pysyy vakaana jännitteen ja lämpötilan vaihteluista huolimatta. Kapasitanssin sopivaksi haarukaksi todettiin 100–1000 pF. Tätä pienemmillä arvoilla vastusten arvot nousevat varsin suuriksi. Yli 1000 pF kapasitanssiin mentäessä hinta puolestaan vaikutti nousevan jyrkästi.

Operaatiovahvistimeksi otettiin kokeiluun kaksi eri mallia: Texas Instrumentsin TL974 [57] ja Analog Devicesin AD8648 [6]. TL974-operaatiovahvistimen kerrotaan olevan erityisen vähäkohinainen: sille ilmoitetaan tyypillisesti $4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ jännitekohinatiheys sisäänmenossa. AD8648:n vastaava lukema on $8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$. Datalehtien käyrien mukaan TL974:n yksikkövahvistuksen rajataajuus 2,7 V käyttöjännitteellä on noin 8,5 MHz [57, s. 5] ja AD8648:n vastaava hieman yli 20 MHz [6, s. 9]. TL974 valittiin sen pienen kohinan perusteella ja AD8648 päätettiin ottaa verrokiksi sen muuten parempien ominaisuuksien vuoksi.

Vahvistin- ja suodinkytken koina arvioitiin LTSpice IV -simulointiohjelman avulla. Ohjelmaan luotiin kytkentä, joka vastasi kuvan 5.13 kytkentää ilman RF-suotimia. Sisäänmenoon lisättiin $2 \text{ k}\Omega$ vastus ja sen rinnalle $2,1 \text{ nF}$ kondensaattori kuvaamaan ultraäänivastaanotinta. Tämän jälkeen suoritettiin simulaatio, jossa käytettiin AD8648-operaatiovahvistinta. Simuloitavan kytkennän kokonaisvahvistukseksi asetettiin 5000. Kaikkien suodinlohkojen kondensaattoreiden kapasitanssit asetettiin samaksi ja kapasitanssia muutettiin arvojen 100 pF, 330 pF ja 1000 pF välillä. Esivahvistimen takaisinkytkentävastus R_f asetettiin $10 \text{ k}\Omega$ suuruiseksi ja vastuksen R_g arvoa muutettiin niin, että esivahvistimen vahvistukseksi saatiin 10, 20 tai 50. Bessel-suotimen ensimmäisen lohkon vahvistusta vaihdeltiin myöskin arvoissa 10, 20 ja 50. Toisen ja kolmannen lohkon vahvistukset olivat kaikissa tapauksissa keskenään yhtä suuret niin, että kytkennän lopullinen vahvistus oli edellä mainittu 5000. Simulaatiossa vastusten arvot olivat laskettuja ideaalisia arvoja. Ulostulon kohinatiheydelle saatiin kuvan 5.14 mukaiset käyrät.



Kuva 5.14 Vahvistin- ja suodinkytken koina.

Odotetusti suurin koina saadaan, kun esivahvistimen ja suotimen ensimmäisen lohkon vahvistukset ovat 10 ja kondensaattorin arvo 100 pF. Pienimmillään koina puolestaan on molempien vahvistusten ollessa 50. Kuvasta nähdään kuitenkin, että muutamia selkeästi heikompiä yhdistelmiä lukuunottamatta erot ovat varsin pieniä.

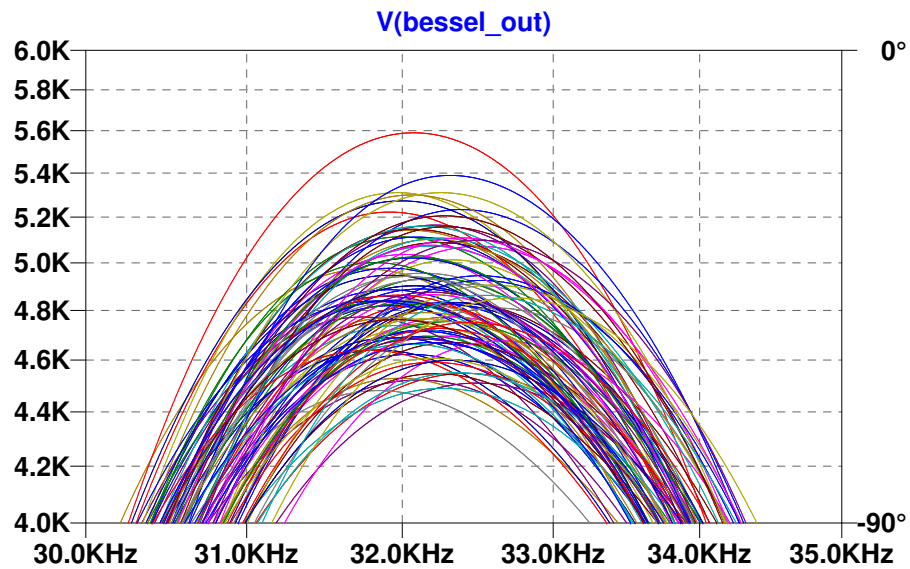
Kuvan 5.14 käyristä löydettiin yhdistelmä, jossa vahvistukset ovat 20 ja kondensaattori 330 pF. Tällöin koinatiheys on suurimmillaan noin $41 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$. Parhaalla käyrällä koinatiheys on suurimmillaan noin $39 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ eli ero näiden välillä on hyvin pieni. Näin ollen mainittu yhdistelmä päätettiin ottaa käyttöön. Kyseisen yhdistelmän koinajännitteen tehollisarvoksi V_n simulaatio ilmoitti 2,7 mV taajuuskaistalla 1 kHz–1 MHz laskettuna.

Kuten edellä on kerrottu, vahvistin- ja suodinkytkenä päätettiin toteuttaa vahvistuksilla 1000 ja 5000. Lisäksi päätettiin kokeilla kahta eri operaatiovahvistinta: TL974 ja AD8648. Näin ollen kytkennästä suunniteltiin neljä eri versiota. Periaatteessa samoilla vahvistuksilla toteutettavissa kytkennöissä voitaisiin käyttää samoja arvoja vastuksille ja kondensaattoreille. Kuitenkin operaatiovahvistimen rajallinen taajuusvaste vaikuttaa toteutuneeseen hyvyysarvoon Q ja keskitaajuuteen f_0 , kuten sivulla 48 todettiin. Kyseistä vaikutusta voidaan pienentää suunnittelemalla keskitaajuus hieman suuremmaksi ja hyvyysarvo pienemmäksi kuin mitä tavoitellaan. Tämän toteuttamiseksi apuna käytettiin jälleen Filter Wizard -työkalua [9], joka tarjoaa korjatut arvot operaatiovahvistimen epäideaalisuudet huomioiden. Koska työkalussa voidaan käyttää ainoastaan Analog Devicesin operaatiovahvistimia, TL974 kytkentää suunniteltaessa työkalussa käytettiin operaatiovahvistinta, jonka yksikkövahvistuksen rajataajuus oli suurin piirtein tätä vastaava. Kaikkien versioiden vastusarvot on esitetty taulukossa 5.1. Lisäksi taulu-

kossa on esitetty vertailun vuoksi kolmen merkitsevän numeron tarkkuudelle pyöristetyt ideaaliset vastusarvot ideaaliselle operaatiovahvistimelle, kun vahvistus on 5000.

	H_0	R_{1AA}	R_{1BA}	R_{2A}	R_{1AB}	R_{1BB}	R_{2B}	R_{1AC}	R_{1BC}	R_{2C}
Ideal	5000	4k51	1k71	180k	24k8	1k09	243k	21k9	961	214k
AD	5000	4k42	1k74	178k	24k3	1k1	237k	21k5	953	210k
	1000				54k9	1k07		47k5	931	
TL	5000	4k32	1k74	174k	23k7	1k1	232k	21k	976	205k
	1000				53k6	1k07		46k4	931	

Taulukko 5.1 Bessel-suotimen eri versioissa käytetyt vastusarvot.



Kuva 5.15 AD8648-operaatiovahvistimella toteutetun vahvistin- ja suodinkytkenän Monte Carlo -analyysi.

Tässä alaluvussa siis suunniteltiin vahvistin- ja suodinkytkenästä neljä versiota jotka poikkeavat toisistaan vahvistuksen ja käytetyn operaatiovahvistimen osalta. Kaikissa versioissa suotimen keskitaajuus on 32,25 kHz ja kaistanleveys noin 4 kHz. Esivahvistimen ja Bessel-suotimen ensimmäisen lohkon vahvistus on kaikissa tapauksissa 20. Kaikissa kytkennöissä käytetään kuvassa 5.13 esitettyjä komponenttiarvoja. Poikkeuksena Bessel-suotimen vastukset, joissa käytetään eri versioissa taulukossa 5.1 esitettyjä arvoja. Esivahvistimen ja Bessel-suotimen vastusten ja kondensaattoreiden toleranssi on 1 %. Kondensaattoreiden tyyppi on C0G. Ainoa poikkeus on esivahvistimen kondensaattori C_g , jona käytetään X7R-kondensaattoria, jonka toleranssi on 5 %. AD8648-operaatiovahvistimella toteutetulle kytkennälle, jonka vahvistus on 5000, suoritettiin Monte Carlo -analyysi LTSpice IV -ohjelmalla käyttäen edellä mainittuja toleransseja. Analyysin tulokset on esitetty kuvassa 5.15. Vahvistus 32,25 kHz taajuudella vaihtelee karkeasti välillä 4400–5600. Simulaatio ei kuitenkaan ilmeisesti huomioi toleransseja operaatiovahvistimen ominaisuuksissa.

6. OHJELMISTOSUUNNITTELU

Tässä luvussa esitellään työssä suunnitellut ohjelmistot. Ensin esitellään järjestelmän toimintaa yleisellä tasolla, minkä jälkeen käydään ohjelmistototeutukset tarkemmin läpi. Yleisluonteisten toimintojen, kuten LCD-näytön ohjauksen, osalta toteutusten esittelyä ei katsottu tarpeelliseksi. Ohjelmistot kirjoitettiin C-kielellä ja käännettiin GCC ARM Embedded-ristikääntäjän versiolla 4.9-2014q4.

Järjestelmä koostuu kahdesta osasta - anturista ja näyttölaitteesta. Näin ollen molempia varten suunniteltiin omat ohjelmistot. Järjestelmän yleistasolla käytännön testejä varten toteutettiin seuraavat toiminnot:

- Anturi mittaa lämpötilan, paineen ja akkujännitteen.
- Mittaustulokset lähetetään 48-bittisenä pakettina.
- Näyttölaitte vastaanottaa tulokset ja esittää ne näytöllä.

Anturin ohjelmisto esitellään alaluvussa 6.1 ja näyttölaitteen alaluvussa 6.2. Näiden lisäksi suunniteltiin ohjelmat, joilla voidaan testata nopeusmittausta termistori- ja paineanturikytkentöjä käyttäen. Nämä on esitelty alaluvuissa 6.3 ja 6.4. Alaluvussa 7.4 esiteltävien ongelmien vuoksi nopeuden mittaamiseen liittyviä toimintoja ei ole toistaiseksi sisällytetty anturin eikä näyttölaitteen ohjelmistoihin.

Paketin sisältö on esitetty taulukossa 6.1. Ensimmäinen tavu on aina sama: seitsemän 1-bittiä ja viimeisenä 0-bitti. Ensimmäisten bittien aikana vastaanotin tahdistuu kantoaaltoon. Viimeisen bitin muutoksen avulla synkronoidaan bittikello. Lisäksi selvitetään, tuleeko vastaanotettu data invertoida, sillä Costasin silmukka voi lukittua kahteen eri vaiheeseen, kuten kerrottiin sivulla 24.

Tämän jälkeen lähetetään syvyyden, lämpötilan ja akkujännitteen mittaustulokset. Ensimmäiset 10 bittiä ilmaisevat syvyyden 10 cm resoluutiolla eli syvyyttä voidaan mitata välillä 0–102,3 m. Seuraavaksi tulee lämpötilan mittaustulos, jonka esittämiseen käytetään 9 bittiä. Näin ollen lämpötila voi olla välillä 0–51,1°C resoluution ollessa 0,1°C. Kolmas mittaustulos on 5-bittinen akkujännite. Tämä suunniteltiin niin, että nollassa toimii 2,7 V jännite, johon lisätään paketin luku kerrottuna 50 mV jännitteellä. Näin ollen akkujännite voidaan ilmoittaa 50 mV resoluutiolla välillä 2,7–4,25 V. Anturi tosin asetetaan lepotilaan, kun akun jännite on 3 V.

b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0
1	1	1	1	1	1	1	0
$SYVYYYS[9:2]$							
$SYVYYYS[1:0]$		$LÄMPÖ[8:3]$					
$LÄMPÖ[2:0]$			$AKKU[4:0]$				
$LASKURI[7:0]$							
$TARKISTUSSUMMA[7:0]$							

Taulukko 6.1 Lähetettävän paketin sisältö.

Viidentenä tavuna lähetetään 8-bittisen laskurin arvo. Sitä kasvatetaan yhdellä aina lähetettävien pakettien välissä. Tämä helpottaa vastaanotettujen pakettien tarkkailua testivaiheessa, jos mittaustulokset pysyvät samoina pakettien välillä. Viimeinen tavu toimii yksinkertaisena tarkistussummana, jolla voidaan vähentää siirrossa vääristyneiden mittaustulosten esittämistä näytöllä. Tarkistussummaa varten mittaustulokset ja laskurin arvon sisältävät neljä tavua lasketaan yhteen. Tuloksen kahdeksaa alinta bittiä käytetään tarkistussummana.

6.1 Anturi

Koska nopeusmittauksia ei saatu käytännössä toimimaan, kuten alaluvusta 7.4 selviää, anturille toteutettiin toistaiseksi ohjelma, joka mittaa ainoastaan lämpötilaa, syvyyttä ja akkujännitettä sekä lähettää tiedot ultraäänilähettimellä. Anturin ohjelmakoodin `main()`-funktio on esitetty ohjelmakoodissa 6.1. Kokonaisuudessaan käännetty ohjelma vei noin 3,5 kilotavua, kun se optimoitiin koon suhteen.

Ohjelmassa suoritetaan ensin vaadittavat alustukset ja mitataan ilmanpaine, joka voidaan vähentää myöhemmin veden alla suoritettavista painemittauksista syvyyttä määrittäessä. Alustettavia oheislaitteita ovat I/O-nastat (*Input/Output*), *SPI*-väylä paine- ja lämpötila-anturin kanssa kommunikointiin, lähetykseen käytettävät ajastimet *TIM1* ja *TIM2*, AD-muunnin akkujännitteen mittausta varten sekä reaaliaikakello (*RTC*, *Real-time Clock*) suorittimen herättämiseksi lepotilasta määrääjain.

Alustusten jälkeen ohjelma siirtyy ikuiseen silmukkaan, jossa mikro-ohjain viettää suuren osan ajasta *stop*-lepotilassa. Reaaliaikakello herättää ohjaimen 250 ms välein, jolloin mitataan lämpötila, syvyys ja akkujännite. Mitatut arvot tallennetaan `Mittausdata_t`-tyyppiseen tietueeseen `md`. Joka neljännellä kerralla, eli kerran sekunnissa, tiedot lähetetään ultraäänilähettimellä. Tällöin osoitin `md`-tietueeseen välitetään parametrina aliohjelmalle `luoPaketti(...)`, joka muotoilee `uint8_t` `paketti[]`-taulukon valmiiksi lähettämistä varten. *LT3572*:n hakkuri käynnistetään ja ulostulojännitteen noustessa riittävän korkeaksi *LT3572* laskee *PGOOD*-linjan, jolloin paketti lähetetään. Paketin lähettämisen jälkeen hakkuri suljetaan.

Testivaiheessa asetettiin LED_2 väläyttämään lähetyksen ajan, minkä avulla on helppo todeta anturin olevan toiminnassa.

```

1 // Paketin ensimmäinen tavu on aina 0b1111 1110
  static uint8_t paketti[PAKETIN_PITUUS] = {0xFE};

  int main(void)
5 {
    Mittausdata_t md; // Tietue lämpötilan, syvyyden ja akkujännitteen
                        // tallentamista varten

    // Alustukset
    GPIOAlusta(); // Alustaa GPIO-nastat
10    alustaLampoJaPaineanturi(); // Alustaa lämpötila- ja paineanturin
    alustaLahetys(); // Alustaa lähetykseen tarvittavat ajastimet ja IO-nastat
    alustaADC(); // Alustetaan AD-muunnin akkujännitteen mittauksia varten
    mittaaIlmanpaine(); // Mitataan ilmanpaine ja talletetaan se mittauksia varten
    alustaRTC(); // Alustetaan reaaliaikakello aiheuttamaan herätyksiä 250 ms välein
15    uint8_t mittauslaskuri = 0;

    while(1) // Ohjelma toimii ikuisessa silmukassa reaaliaikakellon
    { // herätyksen tahdittamana.
        if(RTCLippu) // RTCLippu == 1, jos RTC on aiheuttanut herätyksen
20        {
            HSEKayttoon(); // Käynnistetään kideoskillaattori (suljettu stop-tilassa)
            mittaaLampoJaSyvyys(&md); // Mitataan lämpötila, syvyys
            mittaaAkkujannite(&md); // ja akkujännite
            // (Ohjelman suoritus lopetetaan ja siirrytään standby-lepotilaan, jos
25            // mitattu akkujännite on alle 3V)
            if(++mittauslaskuri == 4) // Tiedot lähetetään joka neljännen mittauksen
            { // jälkeen eli kerran sekunnissa
                mittauslaskuri = 0;
                LED_PORT->BSRR = LED2_PIN; // Vilautetaan lediä LED2 lähetettäessä
30                SHDN_PORT->BSRR = SHDN_PIN; // Käynnistetään LT3572:n hakkuri
                // Muotoillaan lähetettävä paketti mitattujen tietojen perusteella
                luoPaketti(&md);
                // /PGOOD-signaali laskee, kun hakkurin ulostulo
                // saavuttaa asetetun arvon.
35                while(PGOOD_PORT->IDR & PGOOD_PIN);
                // Ultraäänilähettimen kytketty ulostulo käyttöön
                SHDNA_PORT->BSRR = SHDNA_PIN;
                lahetaPaketti(PAKETIN_PITUUS, paketti);
                SHDN_PORT->BRR = SHDN_PIN; // Suljetaan LT3572 ja suljetaan
40                SHDNA_PORT->BRR = SHDNA_PIN; // ultraäänilähettimen ulostulo
                LED_PORT->BRR = LED2_PIN;
            }
            RTCLippu = 0; // Nollataan lippu
        }
45    unitilaStop(); // Odotetaan seuraavaa mittaushetkeä lepotilassa stop
    }
}

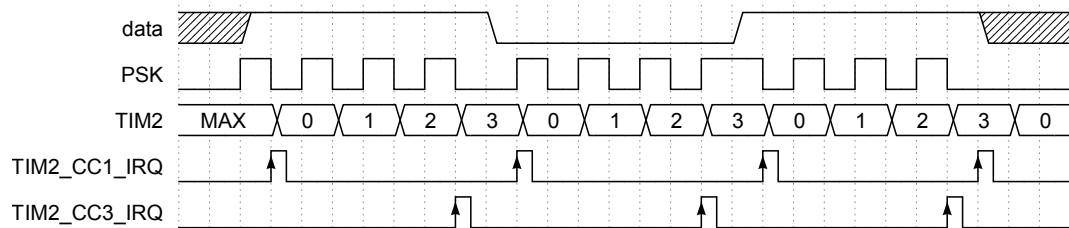
```

Ohjelma 6.1 Anturin main()-funktio

Paine- ja lämpötila-anturin kanssa kommunikoidaan *SPI*-väylällä. MS5541-anturin vaatima kellosignaali tuotetaan piirilevyversiosta riippuen joko *TIM14*- tai *TIM16*-ajastimella. Lämpötila ja paine määritetään datalehdillä ([41, s. 11–12] ja [42, s. 8–9]) esitetyillä kaavoilla. Sekä lämpötila- että syvyytlukemaa keskiarvoistetaan 32 mittauksen eli noin 8 s ajan, jotta pieniä heilahteluita ei suotta

esitetä näytöllä. Lisäksi tällä voidaan syvyyden osalta vähentää aallokon vaikutusta. Jos kommunikointi paine- ja lämpötila-anturin kanssa epäonnistuu, anturi pyritään resetoimaan. Jos tämäkään ei auta, lähetetään syvyyden ja lämpötilan maksimi-arvot virheen merkiksi. Akkujännite mitataan AD-muuntimen avulla ja keskiarvoistetaan vastaavasti 32 näytteen ajan. Jos akkujännitteen keskiarvo laskee alle asetetun 3 V rajan, mikro-ohjain asetetaan *standby*-tilaan. Näin minimoidaan virrankulutus, jotta akkujännite ei laske liian alas.

Lähetyksessä käytetään apuna ajastimia *TIM1* ja *TIM2* sekä keskeytyksiä periaatekuvan 6.1 mukaisesti. Kuvassa lähetetään bitit 101, jotka kukin koostuvat neljästä kanta-aallon jaksosta. Ideana on, että ajastin *TIM1* tuottaa PSK-signaalin. Sen tuottaman ulostulon pulssisuhde on 50/50 ja vaihe riippuu lähetettävästä bitistä. Aina jakson puolivälissä se lähettää liipaisun ajastimelle *TIM2*, jonka laskuria kasvatetaan liipaisujen myötä. Ajastimen *TIM2* laskuri pyörittää ympäri aina bitin ensimmäisen jakson puolivälissä, mistä aiheutuu keskeytys. Tällöin voidaan valmistella ajastimen *TIM1* tila seuraavaksi lähetettävää bittiä varten. Seuraava keskeytys saadaan lähetettävän bitin viimeisellä jaksolla, jolloin ajastimen *TIM1* tila päivitetään seuraavan bitin lähetystä varten. Viimeinen keskeytys saadaan viimeisen bitin viimeisen jakson lopuksi, jolloin voidaan sulkea ajastimet.



Kuva 6.1 Periaatekuva paketin lähettämisestä.

6.2 Näyttölaite

Toistaiseksi toteutetun näyttölaitteen toiminta yleisellä tasolla voidaan esittää varsin lyhyesti. Se mittaa jatkuvasti AD-muuntimella vahvistin- ja suodinkytkennän ulostuloa. Näytteet syötetään demodulaattorille, joka hoitaa saapuvien pakettien vastaanottamisen. Jos paketti todetaan onnistuneesti vastaanotetuksi, sen sisältämät tiedot tulostetaan näytölle. Tässä alaluvussa esitellään ohjelman toiminta lähinnä demodulaattorin toiminnan kannalta. Demodulaattorin toteuttava ohjelmakoodi on esitetty liitteessä A. Käännetty koodi koon suhteen optimoituna oli kooltaan noin 6,5 kilotavua.

AD-muuntimen näytteenottotaajuus on noin 128 ks/s eli nelinkertainen kanta-aallon taajuuteen nähden. Nyquistin säännön mukaan näytteenottotaajuuden tulee olla

vähintään kaksinkertainen suurimpaan signaalin sisältämään taajuuteen nähden. Tässä tapauksessa Costasin silmukan kertojat tuottavat kaksinkertaisia taajuuksia kantaaltoon nähden, joten tarvitaan nelinkertainen näytteenottotaajuus [12, s. 35]. Koska vastaanotettava signaali on kaistanpäästösuodatettu, olisi mahdollista käyttää hyväksi alinäytteistystä, jolloin kantaaltotaajuus periaatteessa sekoittuu alemmalle taajuudelle. Suunniteltu bittikelloratkaisu ei kuitenkaan sovellu kovin hyvin kyseiseen ratkaisuun, joten näytteenottotaajuudessa päädyttiin edellä esitettyyn arvoon.

Demodulointi suoritetaan reaaliaikaisesti. Aina AD-muunnoksen valmistuttua suoritettava keskeytyskäsittelijä kutsuu funktiota `uint32_t demoduloi(...)`. Sille annetaan parametreina juuri mitattu näyte ja osoitin taulukkoon, johon demoduloitu data tallennetaan. Paluuarvoksi saadaan 1, jos paketti on viimeisimmän näytteen myötä kokonaan demoduloitu, muulloin 0. Demodulaattori vähentää saadusta näytteestä aina DC-tason, minkä jälkeen muokattu näyte talletetaan puskuriin. Muu toiminta riippuu demodulaattorin tilasta.

Tilassa `EI_SIGNAALIA` demodulaattori odottaa, että riittävän vahva signaali havaitaan. Tätä varten tutkittava näyte syötetään funktiolle `uint32_t tunnistaSignaali(...)`. Tämä mittaa signaalin tehoa liukuvasti kahdeksan näytteen ajalta. Jos laskettu teho on asetettua rajaa suurempi, kasvatetaan laskurin aikalaskuri arvoa. Tehon ollessa rajaa pienempi laskurin arvo nollataan. Kun laskuri saavuttaa arvon 384, on signaalin teho ollut asetettua rajaa suurempi noin 3 ms ajan. Tällöin palautetaan 1, muulloin 0. Ajatuksena on, että lyhyet piikit vastaanotettavassa signaalissa eivät käynnistä varsinaista demodulointia.

Kun riittävän vahva signaali on havaittu, demodulaattori siirtyy tilaan `SYNK_VIIVE`, jossa ollaan noin 3 ms ajan. Edellä mainitun puskurin vanhimpia näytteitä ryhdytään syöttämään Costasin silmukalle. Puskurin pituus vastaa tunnistimen mittausaikaa eli ensimmäisenä syötettävä näyte kuuluu paketin alkuun. Tässä vaiheessa silmukka pyrkii tahdistumaan kantaaltoon, minkä vuoksi I-haaran ulostulo voi joskus vaihdella nollan kahden puolen. Kolmen millisekunnin kuluttua oletetaan silmukan toiminnan stabiloituneen ja siirrytään tilaan `SYNK_ODOTUS`. Nyt demodulaattori odottaa, että I-haaran ulostulossa tapahtuu nollanylitys.

Kun paketin ensimmäisen tavun viimeinen bitti vastaanotetaan, I-haaran ulostulon etumerkki vaihtuu. Nollanylityksen hetkellä nollataan bittikellon vaihe ja siirrytään tilaan `HAE_VAIHE`. Kun päästään bitin puoliväliin, bittikellon nousevalla reunalla luetaan I-haaran ulostulon arvo. Jos arvo on negatiivinen, myöhempiä bittejä ei tarvitse invertoida. Arvon ollessa positiivinen asetetaan muuttuja `invertointi`, jolloin kaikki vastaanotettavat databitit invertoidaan.

Nyt siirrytään tilaan VASTAANOTTO ja ryhdytään kokoamaan vastaanotettavaa pakettia. Aina bittikellon nousevalla reunalla luetaan I-haaran arvo. Sen ja invertointi-muuttujan avulla päätellään vastaanotetun bitin arvo. Bitit tallennetaan parametrina saatuun taulukkoon. Kun kaikki paketin sisältämät bitit on vastaanotettu, funktio palauttaa tämän merkiksi arvon 1. Lisäksi siirrytään tilaan TAUKO, jolloin demodulaattori määrittää ainoastaan vastaanotetun signaalin DC-tason. Tässä tilassa vietetään noin 50 ms. Ideana on, että demodulaattori ei reagoi esimerkiksi heijastuksiin välittömästi paketin jälkeen. Kun asetettu aika on kulunut, demodulaattori palaa EI_SIGNAALIA-tilaan odottamaan saapuvaa pakettia.

Demodulaattorin voisi toteuttaa myös niin, että ohjelma tarkkailee vastaanotetun signaalin tasoa samalla tavalla kuin nyt toteutetussa ohjelmassa. Kun riittävän vahva signaali havaitaan, ryhdytään tallettamaan näytteitä puskuriin, jonka pituus on riittävä koko paketin tallentamiseksi. Demodulointi suoritetaan, kun koko paketti on vastaanotettu. Tässä tapauksessa riittäisi hitaampi suoritin, kun pakettien välinen aika on selvästi paketin pituutta suurempi. Muistia vastaavasti tarvitaan hieman enemmän. Koska käytettävissä olleen suorittimen nopeus oli riittävä, tässä työssä toteutettu demodulaattori toimii reaaliaikaisesti.

Aliohjelma `CostasSilmukka(...)` toteuttaa alaluvussa 4.3.4 esitellyn Costasin silmukan. Aluksi silmukka hakee taulukosta NCO:n vaihetta vastaavat kosini- ja sini-funktioiden arvot, jonka jälkeen näillä kerrotaan parametrina saatu näyte. Kertojien ulostulot suodatetaan summaimilla, jotka vastaavat periaatteessa keskiarvon laske- mista, mutta tulosta ei tarvitse jakaa näytteiden määrällä. Mitä pidemmältä ajalta ulostuloa summataan, sen vähemmän ulostulo sisältää kohinaa. Toisaalta pidemmän summainen havaittiin kaventavan taajuusalueetta, jolle silmukka voi lukittua. Tässä työssä käytetty pituus on 80.

Tähän asti laskutoimitukset on toteutettu kokonaisluvuilla. Summaimien ulostulot syötetään parametreina funktiolle `float vaihevertailu(...)`, jonka ulostulo on liukuluku. Työssä käytetty suoritin sisältää liukulukukyksikön, joten PLL:n toiminnot päätettiin toteuttaa liukuluvuilla paremman tarkkuuden vuoksi. Vaihevertailija toteuttaa lähteessä [25] esitetyn arkustangentti-funktion approksimaation. Laskettu vaihe palautetaan negatiivisena, jolloin se sopii erosignaaliaksi PLL:lle. Erosignaali suodatetaan digitaalisella PI-suotimella, joka on toteutettu lähteen [28, s. 32–35] mukaan. Suodin voidaan esittää kaavalla

$$u_f(n) = -a_1 u_f(n-1) + b_0 u_d(n) + b_1 u_d(n-1), \quad (6.1)$$

jossa u_f on suotimen ulostulo ja u_d suotimelle syötettävä vaihevertailijan ulostulo. Suotimen luonnolliseksi taajuudeksi f_n valittiin 140 Hz. Vaimennussuhteeksi ξ asetettiin $1/\sqrt{2}$. Kyseisellä taajuudella PLL ehtii hyvin lukittua kantoaalttoon ensim-

mäisen tavun aikana. Taajuus ei kuitenkaan voi olla liian suuri, sillä tällöin PLL ehtii seuraamaan vaiheen muutosta bitin tilan vaihtuessa eikä ilmaisu onnistu. Luonnollisen taajuuden, vaimennussuhteen ja NCO:n sekä vaihevertailijan ominaisuuksien perusteella määritettiin kertoimet b_0 ja b_1 . Kerroin a_1 on -1.

Suotimen ulostulo syötetään NCO:lle. Jos u_f on nolla, NCO kasvattaa vaihetta sille asetetun perustaajuuden mukaan. Perustaajuudeksi asetettiin näytteenotto-taajuuden neljäsosa. Suotimen ulostulo lisätään vaihemuutokseen, joten kantoaallon taajuuden tai vaiheen poiketessa NCO:n ulostulosta, suotimen ulostulo asettuu niin, että silmukka lukittuu kantoaaltoon. NCO:n vaiheen muutos jaetaan 32:lla, joka vastaa kantoaallon jaksojen määrää yhden bitin aikana. Saadulla tuloksella kasvatetaan bittikellon vaihetta, jolloin bittikellon taajuus vastaa tiedonsiirron taajuutta.

Testausvaiheessa mikro-ohjaimen DA-muunninta käytettiin apuna Costasin silmukan tilan tarkkailussa. Silmukan ulostulo syötettiin sopivasti skaalattuna DA-muuntimelle, jolloin sitä oli helppo mitata oskilloskoopilla. Vastaavalla tavalla voitiin mitata esimerkiksi bittikellon vaihetta.

6.3 Termistorikytkennän testiohjelma

Termistorikytkennän kokeilua varten toteutettiin liitteessä B esitetty ohjelmakoodi. Ohjelman aluksi alustetaan I/O-nastat. Tämän jälkeen käynnistetään LT3572-mikropiirin hakkuri nostamalla signaali \overline{SHDN} ylös, jonka jälkeen odotetaan \overline{PGOOD} -signaalin laskua. Nyt hakkuri on toimintakunnossa, joten otetaan molemmat H-sillat käyttöön asettamalla signaalit \overline{SHDNA} ja \overline{SHDNB} ylätilaan.

DA-muunnin alustetaan niin, että sen ulostulojännite vastaa sivulla 39 olevan kuvan 5.9 jännitettä V_{NTC} , kun termistorin lämpötila on 45°C. Ohjelmassa ei huomioitu jännitettä V_{BOOST} . DA-muuntimen ulostulobufferia ei otettu käyttöön, koska analoginen komparaattori muodostaa suuri-impedanssisen kuorman.

Analogisen komparaattorin *COMP2* invertoiva sisäänmeno liitettiin DA-muuntimen ulostuloon. Jännite V_{NTC} puolestaan on kytketty ei-invertoivaan sisäänmenoon. Ulostulo ohjattiin ajastimen *TIM1* signaaliin *OCREF_CLR_INPUT*, jonka avulla PWM-signaali voidaan laskea [52, s. 337], kun haluttu termistorin lämpötila saavutetaan.

Ajastimen *TIM1* kanava 3 asetettiin tuottamaan PWM-signaalia ulostulonastaan *PA10* taajuudella 1 kHz. Pulssinleveydeksi asetettiin lähes 100 %. Kyseisellä PWM-signaalilla lämmitetään termistoria. Kylmää termistoria siis lämmitetään lähes suurimmalla mahdollisella teholla. Termistorin saavuttaessa asetetun lämpötilan

analoginen komparaattori katkaisee virransyötön. Pulssinleveys, eli syötetty teho, riippuu nyt virtauksesta.

Ajastimen *TIM1* kanava 4 asetetaan sieppaustilaan. Tällöin laskurin arvo talletetaan aina PWM-signaalin laskiessa alas. Kyseinen sieppaustapahtuma aiheuttaa keskeytyksen. Keskeytyskäsitteijässä saatu arvo syötetään liukuvan keskiarvon 1024 näytteen ajalta laskevalle suotimelle. Tulos suodatetaan, koska yksittäinen pulssinleveys vaihteli merkittävästi.

Suodatettu PWM-signaali syötetään ajastimen *TIM1* kanavaan 2, joka on kytketty ulostulonastaan *PA9*. Pulssinleveys voidaan nyt mitata oskilloskoopilla kyseisestä nastasta tai LT3572:n ulostulosta. Testikytkennässä ultraäänilähetintä ei luonnollisesti ole kytketty.

6.4 Pitot-putkimittauksen testiohjelma

MP3V5004-paineanturilla suoritettavaa Pitot-putkeen perustuvaa nopeusmittausta varten kirjoitettiin liitteessä C esitetty ohjelma. Testausta varten paineanturi liitettiin STM32F0DISCOVERY-kokeilualustaan. Lisäksi kokeilualustaan liitettiin HD44780-yhteensopiva LCD-näyttö mittaustulosten esittämistä varten.

Ohjelman aluksi alustetaan LCD-näyttö. Lisäksi alustetaan tarvittavat mikro-ohjaimen oheislaitteet, joita ovat AD-muunnin, ajastin *TIM3* ja oikosiirto- eli DMA-ohjain (*Direct Memory Access*). AD-muunnin asetetaan mittaamaan kanavaa 0, johon paineanturin ulostulo on liitetty. Ajastin *TIM3* asetetaan tuottamaan liipaisu AD-muuntimelle 2,56 kHz taajuudella.

Alustusten jälkeen mitataan paineanturin ulostulon *offset*-jännite. Jotta saadaan tarkka tulos, anturi tulee resetoinnin jälkeen pitää paikallaan samassa asennossa kuin mittausten aikana eikä sen sisäänmenojen välillä saa olla paine-eroa. Mittaukseen käytetään aliohjelmaa `MP3V5004Mittaa()`. Aliohjelma käynnistää AD-muunnokset, jonka jälkeen suoritin asetetaan unitilaan. DMA-ohjaimen avulla talletetaan saadut näytteet taulukkoon `nyyteTaulu`. Aliohjelman yhdellä kutsulla suoritetaan aina 256 muunnosta, mikä kestää noin 100 ms. Kun muunnokset on tehty, DMA-ohjaimen keskeytys herättää suorittimen. Näytteistä lasketaan keskiarvo funktiolla `int32_t laskeKA256()`. *Offset*-jännitettä mitattaessa aliohjelmaa `MP3V5004mittaa()` kutsutaan 64 kertaa ja keskiarvo lasketaan yhteensä 16384 mittauksen osalta.

Tämän jälkeen ohjelma pyörii ikuisessa silmukassa. Silmukan aluksi suoritetaan muunnokset aliohjelmalla `MP3V5004Mittaa()` ja lasketaan näiden keskiarvo kuten edellisessä kappaleessa. Tuloksista lasketaan lisäksi noin 6,4 s ajalta liukuva

keskiarvo, jonka avulla saadaan näytölle vakaampi lukema esimerkiksi aallokossa. AD-muuntimen hetkellinen lukema ja liukuva keskiarvo tulostetaan näytölle. Tämän jälkeen molemmista lasketaan nopeus yksikössä km/h. Myös nopeudet tulostetaan näytölle. Laskuihin ja tulostuksiin silmukassa kuluu hieman yli 2 ms aikaa.

Nopeus v yksikössä km/h saadaan kaavaa (4.4) mukaillen seuraavasti:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,6^2 \cdot ADC_{OUT}}{\rho S}} \approx \sqrt{0,031648352 \cdot ADC_{OUT}}, \quad (6.2)$$

jossa ADC_{OUT} on AD-muunnoksen tulos, ρ veden tiheys ja S anturin herkkyys AD-muuntimen tulokseen nähden. Tässä tapauksessa herkkyydeksi määritettiin 0,819 1/Pa. Kerroin $3,6^2$ tulee muuntokertoimesta yksiköiden m/s ja km/h välillä. Veden tiheytenä käytettiin arvoa 1000 kg/m³.

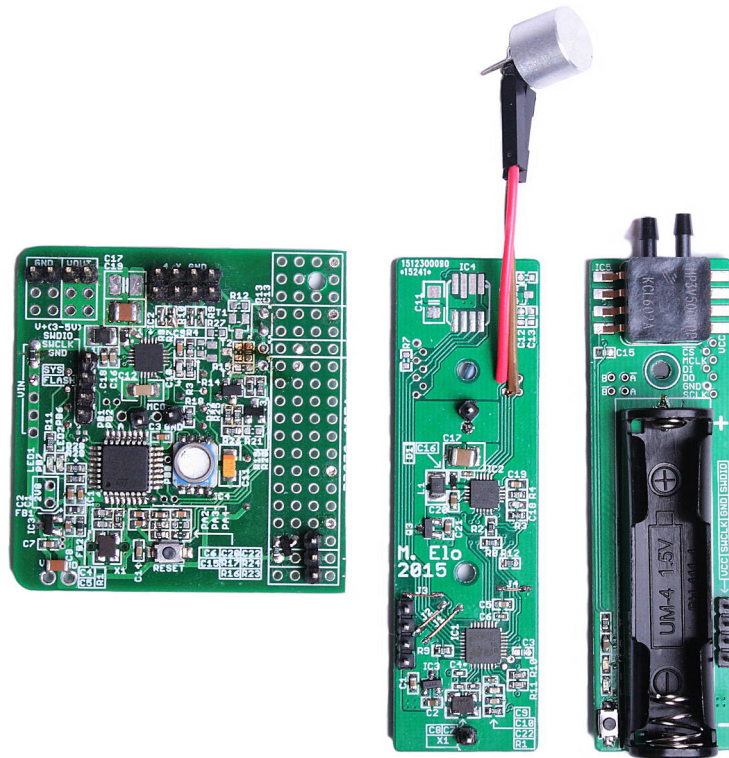
7. TULOKSET

Tässä luvussa esitellään järjestelmälle suoritettujen mittausten ja kokeiden tulokset. Aluksi käsitellään anturille suoritettut mittaukset. Kyseisissä mittauksissa tutkittiin lähinnä akkujännitteen mittauksen ja hakkurikytkennän toimintaa sekä anturin virrankulutusta. Seuraavaksi esitellään vahvistin- ja suodinkytkennän mittaus-tulokset taajuusvasteen, kohinan ja RF-suodatuksen osalta. Tämän jälkeen käydään läpi ultraäänilähettimille ja -vastaanottimille suoritettut kokeet. Nopeuden mittaaminen koitui selkeäksi haasteeksi työn kannalta. Myös siihen liittyvät tulokset esitellään tässä luvussa. Lopuksi esitellään järjestelmälle suoritettut käytännön kokeet lähinnä tiedonsiirron kannalta.

7.1 Anturin mittaukset

Anturia varten suunniteltiin kaksi piirilevyversiota, joista ensimmäinen sisälsi paljon mittauspisteitä ja ylimääräisiä komponentteja ensimmäisiä testejä varten. Pääpiirteissään kytkentä koostui mikro-ohjaimesta, LT3572-mikropiiristä, MS5541-anturista ja näiden vaatimista oheiskomponenteista. Nopeusmittausta varten levyllä oli termistorikytkentä.

Jälkimmäinen versio toteuttaa pitkälti alaluvussa 5.1 esitetyn kytkennän. Se suunniteltiin mahdollisimman pienikokoiseksi valiten kuitenkin komponenttien kotelot niin, että ne ovat käsin juotettavissa. Piirilevyn mitoiksi tuli 72×21 mm, mikä määräytyi lähinnä akun pidikkeen ja MP3V5004-anturin mukaan. Nämä sijaitsivat samalla puolella levyä ja muu kytkentä mahtui toiselle puolelle. Kyseisen piirilevyn suunniteltiin käyttävän nopeusmittaukseen MP3V5004-anturia, joten siinä ei ole paikkoja termistorikytkennän komponenteille. Lisäksi jännitteenjakokytkentä akkujännitteen mittausta varten pääsi unohtumaan suunnitteluvaiheessa. Koska nopeusmittauksien suhteen ei päästy tavoitteisiin, mittauksissa ja käytännön kokeissa jännitteenjakokytkentä juotettiin MP3V5004-anturin ulostulon suodatuskomponenttien paikalle ja akkujännite vietiin johdolla anturin ulostulonastan paikalle. Molemmat piirilevyversiot nähdään kuvassa 7.1. Paineanturia ei ole juotettu oikeanpuoleiselle levyille, vaan se on aseteltu paikalleen ainoastaan kuvausta varten. Keskimmaisessä levyssä on akkupidikkeen sijaan piikit, joihin voidaan tuoda jännite laboratorioteho-lähteeltä.



***Kuva 7.1** Anturia varten rakennettuja prototyyppejä. Ensimmäinen piirilevyversio vasemmalla, vieressä kaksi uudempaa mallia eri puolilta kuvattuna.*

Tässä alaluvussa esiteltävissä mittauksissa käytettiin lähinnä jälkimmäistä piirilevyversiota, mutta oletettavasti hyvin vastaavat tulokset olisi saatu myös ensimmäisellä versiolla. Kootuille levyille suoritetuissa alustavissa mittauksissa todettiin muun muassa käyttöjännitteiden ja kideoskillaattorin taajuuden vastaavan suunniteltua. Lisäksi väärinpäin kytketyltä akulta suojaava kytkentä todettiin toimivaksi sekä tarkoituksella että muutamaa otteeseen tahattomasti.

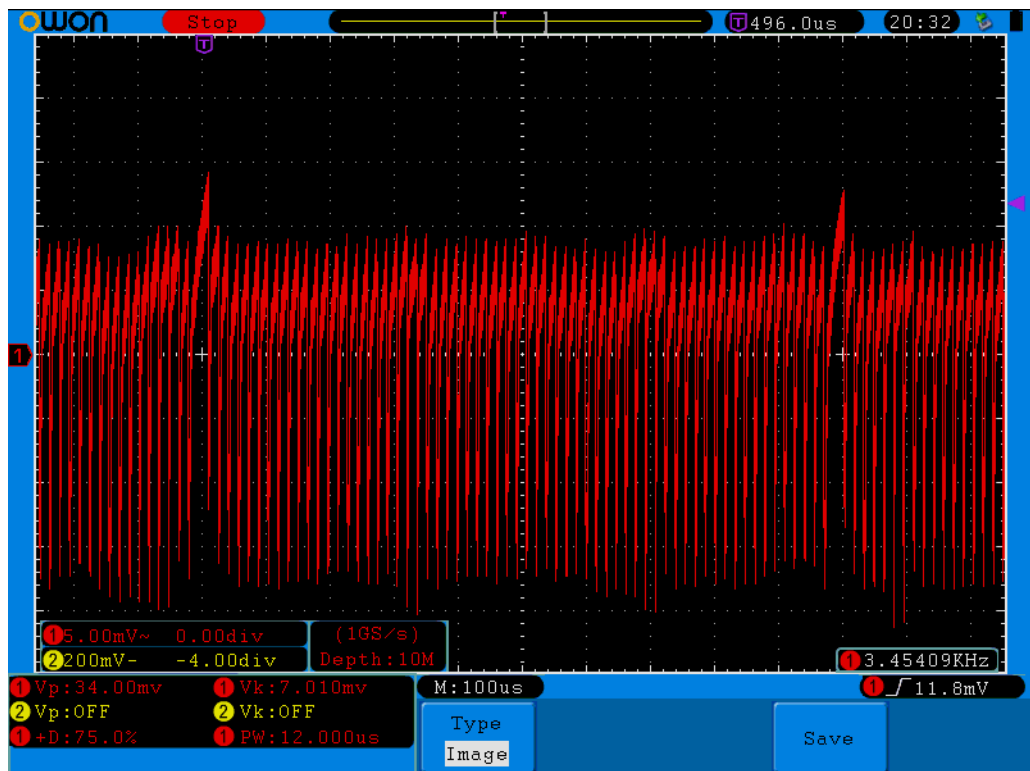
7.1.1 Akkujännitteen mittausta

Akkujännitteen mittausta toimi odotetusti. Tämän toteamiseksi anturille syötettiin käyttöjännite laboratorioteholähteeltä. Anturin ultraäänilähetin asetettiin alle 10 cm etäisyydelle näyttölaitteen vastaanottimesta, sillä yhteys toimi 32,25 kHz kanta-aaltotaajuudella ilmassa vain hyvin lyhyellä matkalla. Anturille syötettävää jännitettä mitattiin yleismittarilla ja jännitettä muutettiin välillä 3–4,2 V. Näyttölaitteen ilmoittama lukema vastasi yleismittarin lukemaa 50 mV tarkkuudella kaikilla mitatuilla jännitteillä.

Myös akun alijännitesuojauksen raja vaikutti toimivan täsmällisesti. Laite toimi normaalisti, kun laboratorioteholähteeltä syötettiin 3,02 V jännite. Kun jännitteeksi asetettiin 2,97 V, laite siirtyi virransäästötilaan muutamassa sekunnissa.

7.1.2 Hakkuri

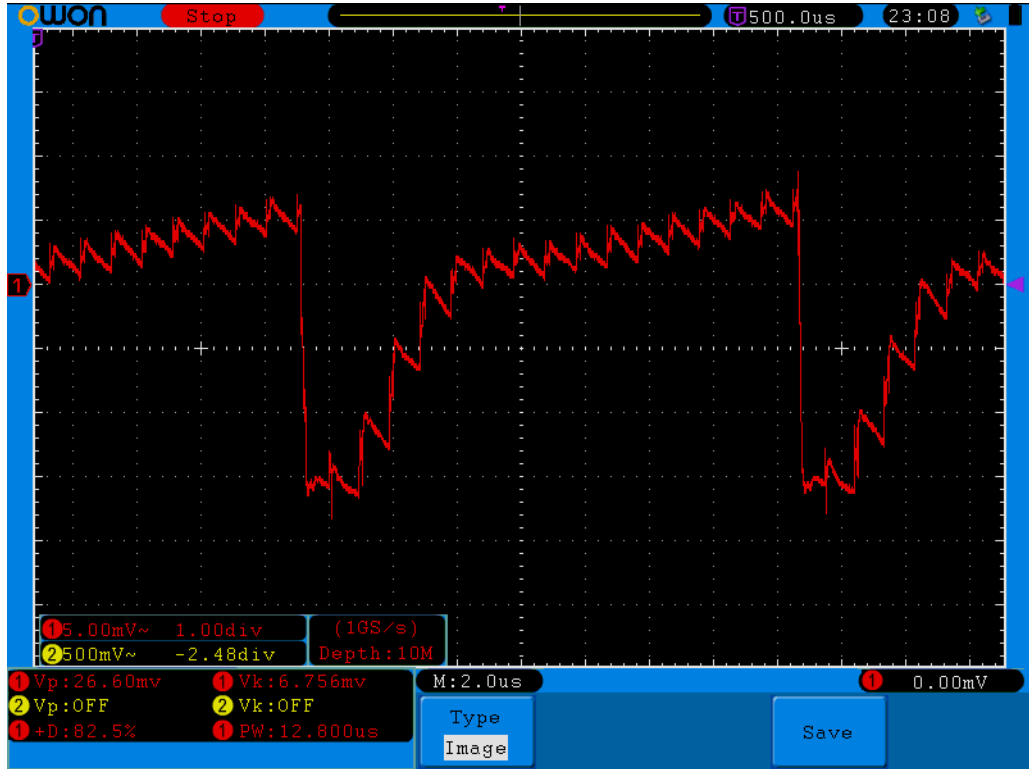
LT3572-mikropiiri tarjoaa jännitettä nostavan boost-hakkurin ja kaksi H-siltaa. Mikropiiriä varten suunniteltu kytkentä esiteltiin kuvassa 5.6 sivulla 35. Tavoitteena oli, että hakkuri tuottaa noin 24 V ulostulojännitteen, jolla voidaan syöttää ultraäänilähetintä H-sillan avulla. Mittauksia varten H-siltaan nastojen A ja \bar{A} välille liitettiin $2\text{ k}\Omega$ vastus ja $2,2\text{ nF}$ kondensaattori rinnakkain tarjoamaan hieman ultraäänilähetintä vastaavan kuorman. Mikro-ohjaimelle toteutettiin ohjelma, joka tuotti nastaan $PWMA$ jatkuvaan PSK-signaalia $32,25\text{ kHz}$ kantoaaltotaajuudella. Signaalin vaihetta käännettiin noin 1 kHz taaajuudella eli periaatteessa ”lähetettiin” vuorotellen 1- ja 0-bittejä.



Kuva 7.2 Hakkurin ulostulon rippelijännite.

Kuvassa 7.2 on esitetty ulostulokondensaattorilta C_3 mitattu rippelijännite, kun käyttöjännitteeksi syötettiin laboratorioteholähteellä $3,6\text{ V}$, joka on litiumioniakun tyypillinen nimellisjännite. Rippeli on suuruudeltaan pääsääntöisesti alle 30 mV ja aiheutuu lähinnä kuorman kapasitanssista. Aina H-sillan ulostulon tilan vaihtuessa kondensaattorille syötetään virtapiikki, jolloin hakkurin ulostulojännite laskee. Kuten kuvasta nähdään, jännite nousee kahteen kertaan hetkinä, jolloin PSK-signaalin vaihe kääntyy. Tällöin H-sillan ulostulo pysyy pidempään samassa tilassa. Näin ollen vaikuttaisi, että hakkurin ulostulojännite ei ehdi toipua takaisin asetettuun jännitteeseen virtapiikin jälkeen. Yleismittarilla ulostulojännitteeksi mitattiin $23,8\text{ V}$ eli hieman vähemmän kuin suunniteltu noin 24 V . Ero ei kuitenkaan

ole sovelluksen kannalta merkittävä. Myöskään mitatulla rippelijännitteellä ei ole vaikutusta lähetyksen toimintaan. Kuvassa 7.3 on esitetty rippelijännite hieman lyhyemmällä aikajaksolla. Hakkurin noin 1 MHz kytkentätaajuudella näkyvä rippeli on suuruudeltaan alle 5 mV.

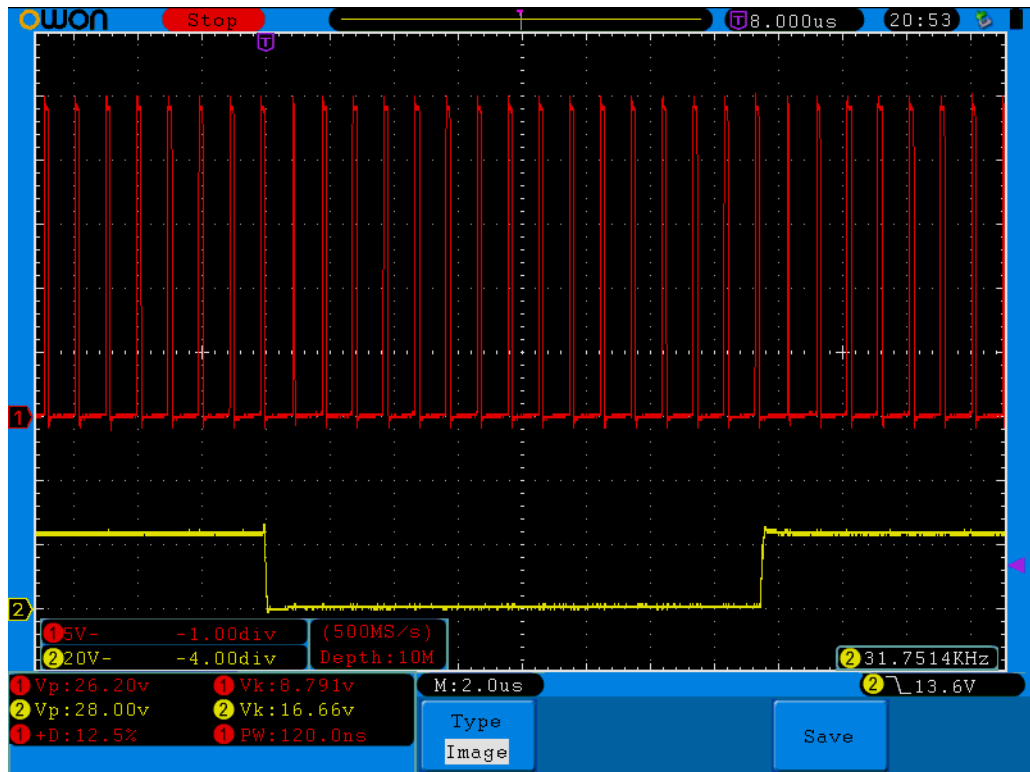


Kuva 7.3 Hakkurin ulostulon rippelijännite kuvaa 7.2 lyhyemmältä ajalta.

Kuvan 7.4 ylempi aaltomuoto esittää kelan L_1 , diodin D_1 anodin sekä hakkurin kytkintransistorin välisen pisteen ja alempi H-sillan ulostulon A jännitteen maahan nähden. Ylemmässä aaltomuodossa ei ole havaittavissa isoja piikkejä tai värähtelyä, joita kyseiseen mittauspisteeseen liittyvät parasiittiset induktanssit tai kapasitanssit piirilevyllä voisivat aiheuttaa. Hakkurin pulssisuhde on suurempi aina H-sillan ulostulon muuttuessa johtuen edellisessä kappaleessa mainitusta kondensaattorille syötettävästä virtapiikistä. Muuten pulssisuhteessa ei ole isoja vaihteluita eli stabiiliuden kanssa ei liene ongelmia.

Hakkurin hyötysuhdetta arvioitiin muuttamalla laboratorioteholähteen ulostulojännitettä välillä 3–4,2 V ja tarkkailemalla kytkennälle syötettävää virtaa lähteen näytöltä. Hakkurin ulostulojännitteeksi mitattiin edellä mainittu 23,8 V. Näin ollen kuormana toimineelle vastukselle syötetään noin 280 mW teho. Kuormassa lisäksi olevalle kondensaattorille syötettävä keskimääräinen virta I voidaan laskea seuraavasti:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{VC}{t} = 4AfC, \quad (7.1)$$



Kuva 7.4 Hakkurin kytkimen (yllä) ja H-sillan ulostulon (alla) jännitteet.

jossa Q on kondensaattoriin ajassa t syötetty varaus, f syöttävän kanttiaallon taajuus ja A kanttiaallon amplitudi. Kerroin 4 johtuu siitä, että kanttiaallon yhden jakson aikana kondensaattorille syötettävä jännite muuttuu kahdesti ja muutos on kaksi kertaa amplitudin suuruinen. Tässä tapauksessa kondensaattorin keskimääräiseksi virraksi saatiin noin 6,8 mA eli sille syötettäväksi tehoksi muodostuu noin 160 mW. Kuorman yhteisteho on siis noin 440 mW. Hyötysuhteet eri sisäänmenojännitteillä on esitetty taulukossa 7.1.

V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	Hyötysuhde
3	0,22	0,66	0,44	0,67
3,3	0,19	0,63	0,44	0,71
3,6	0,17	0,61	0,44	0,73
3,9	0,15	0,59	0,44	0,76
4,2	0,14	0,59	0,44	0,76

Taulukko 7.1 Hakkurin hyötysuhde eri sisäänmenojännitteillä.

Taulukon perusteella kytkennän hyötysuhde ei ole erityisen hyvä, mutta sen vuoksi ei toistaiseksi ryhdytty toimenpiteisiin. Todellisuudessa hyötysuhde on kuitenkin hieman parempi. Osa sisäänmenovirrasta syötetään hakkurin sijaan mikro-ohjaimelle. Tämä virta on muutamien milliampeerien luokkaa. Lisäksi kytkennän teholahteeseen liittämiseksi käytettiin yhteensä lähes 2 m johtoa, jonka resistanssilla on myös oma vaikutuksensa. Haluttaessa hyötysuhdetta voitaisiin parantaa

esimerkiksi vaihtamalla hakkurikytkennän kela ja väärinpäin kytketyltä akulta suojaava MOSFET-transistori pienemmän resistanssin omaaviin.

7.1.3 Virrankulutus

Tässä alaluvussa esitellään tulokset mittauksista, joilla selvitettiin anturin virrankulutusta. Sen kannalta anturin toiminta voidaan jakaa kolmeen tilaan: mittauksiin, lähetykseen ja lepotilaan. Anturi suorittaa lämpötilan, syvyyden ja akkujännitteen mittaukset sekä niihin liittyviä laskutoimituksia 250 ms välein. Kerran sekunnissa tiedot lähetetään eteenpäin. Lopun ajan anturi viettää lepotilassa. Lisäksi akkujännitteen laskiessa alle asetetun 3 V rajan, anturi siirtyy mahdollisimman pienivirtaiseen lepotilaan, jotta akun jännite ei laske liian alas. Kyseisestä lepotilasta ei enää palata normaaliin ohjelman suoritukseen.

Anturin virrankulutusta tarkasteltaessa käytettiin lähetyksen osalta taulukossa 7.1 esitettyjä arvoja ja lisäksi mitattiin virrankulutusta mikro-ohjaimen eri lepotiloissa sekä mittausten aikana. Lepotilojen osalta mittaukset suoritettiin *stop*- ja *standby*-tiloissa hieman erilaisilla kytkennöillä. Tilat eroavat toisistaan lähinnä sen suhteen, että *stop*-tilassa mikro-ohjaimen sisäinen regulaattori on toiminnassa, jolloin SRAM-muistin ja rekisterien sisältö sekä IO-nastojen tilat säilyvät. *Standby*-tilassa regulaattori suljetaan ja muistin sisältö menetetään. IO-nastat ovat korkeaimpedenssisessä tilassa. [52, s. 92–95]

Mittausta varten toteutettiin ohjelmat, jotka siirtyivät heti vaadittujen alustusten jälkeen lepotilaan. Mittauksissa kytkennän jännite syötettiin laboratorioteholähteellä ja jännitteensyötön kanssa sarjaan kytkettiin 1 k Ω vastus, joka voitiin oikosulkea. Mikro-ohjain käynnistettiin vastus oikosuljettuna, sillä alustuksia suoritettaessa se vaatii useiden milliampeerien virran. Kun ohjain oli lepotilassa, oikosulku poistettiin ja virrankulutus määritettiin mittaamalla vastuksen yli oleva jännite yleismittarilla.

Taulukossa 7.2 on esitetty mittaustulokset, kun laitteelle syötettiin 3 V jännite. Sarake *RTC + LSI* ilmaisee oliko mittauksen aikana reaaliaikakello *RTC* ja mikro-ohjaimen sisäinen 40 kHz oskillaattori *LSI* (*Low-speed Internal RC Oscillator*) toiminnassa mittauksen aikana. Yhden mikroampeerin suuruinen virrannousu kyseisten oheislaitteiden ollessa toiminnassa vastaa hyvin datalehdellä [51, s. 52–53] esitettyjä arvoja.

KytKentä A tarkoittaa kytkentää, joka sisälsi ainoastaan mikro-ohjaimen ja teholähteen, eli kuvissa 5.1 (s. 29) ja 5.12 (s. 45) esitetyt komponentit, poislukien akkujännitteen mittaukseen käytetty jännitteenjakokytkentä. Kytkentään B lisättiin

Lepotila	$RTC + LSI$	Virta (μA)	KytKentä
<i>standby</i>	Ei	4,5	A
	Ei	19,7	B
	Ei	26,9	C
<i>stop</i>	Ei	22,2	B
	Kyllä	23,2	
	Ei	30	C
	Kyllä	31	

Taulukko 7.2 Anturin virrankulutus lepotiloissa eri kytkennöillä.

kyseinen jännitteenjakokytkentä ja kytkentään C lisäksi kuvan 5.6 (s. 35) LT3572-kytkentä. Kytkentää C testattiin *stop*-tilassa myös 4,2 V syöttöjännitteellä, jolloin virta oli noin 9 μA suurempi. Lukema täsmää virran kasvuun vastusten R_1 , R_2 , R_{13} ja R_{14} läpi syöttöjännitteen kasvaessa.

Paine- ja lämpötila-anturi ei ollut kytkettynä lepotiloissa suoritetuissa mittauksissa. Alaluvussa 5.1.5 esitettyjen virrankulutusten perusteella sen vaikutus oletettiin mitättömäksi, jos kytkentänastojen tilat lepotilan aikana on järkevästi asetettu. *Standby*-tilaa ajatellen MS5803-anturia käytettäessä \overline{CS} -signaaliin olisi ehkä syytä lisätä ylös vetovastus.

Lopuksi mitattiin virrankulutus anturin suorittamien mittausten aikana kytkennälle, jossa oli mukana MS5541-anturi. Tätä varten toteutettiin ohjelma, joka toisti lämpötilan, syvyyden ja akkujännitteen mittausta ikuisessa silmukassa. Tällöin virrankulutus oli noin 2,7 mA. Normaalisti mittauksiin kuluu enintään noin 70 ms, joten neljä kertaa sekunnissa suoritettuna keskimääräinen virrankulutus on noin 0,8 mA. MS5803-anturia käyttäen mittauksiin kuluisi käytetystä resoluutiosta riippuen noin 1–17 ms [42, s. 1] eli sen virrankulutus voisi olla vielä pienempi.

Edellä esitettyjen tulosten perusteella kokonaisuuden kannalta suurin merkitys on lähetyksen aikana kulutettavalla virralla. Esimerkiksi litiumioniakun tyypillisellä 3,6 V nimellijännitteellä lähettämiseen tarvittava virta on taulukon 7.1 mukaan noin 170 mA. Kerran sekunnissa lähetetään 48 bitin paketti tiedonsiirtonopeudella 1 kb/s. Oletetaan tähän kuluvan aikaa 50 ms, kun huomioidaan hakkurin käynnistäminen aina ennen lähetystä. Tällöin keskimääräinen virrankulutus on 8,5 mA. Kun tähän lisätään mittausten aikana kulutettu virta, voidaan hieman yläkanttiin lopulliseksi lukemaksi arvioida 10 mA. Tällöin jo 300 mAh akku tarjoaisi noin 30 h toiminta-ajan.

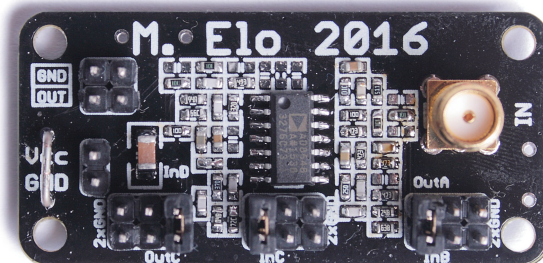
Eri lepotilojen virroilla on merkitystä lähinnä akun alijännitesuojauksen kannalta. Tässä tapauksessa parhaaseen tulokseen päästään, kun mikro-ohjain asetetaan *standby*-tilaan akkujännitteen laskiessa alle asetetun rajan. Tällöin kulutus on 3 V jännitteellä noin 26,9 μA . Jos jännitteenjako- ja LT3572-kytkentöihin lisättäisiin

P-tyypin MOSFETit, kuten MP3V5004-anturin tapauksessa, mikro-ohjain voisi kytkeä niille jännitteen vain tarvittaessa. Tällöin voitaisiin mittausten perusteella päästä alle $5 \mu\text{A}$ kulutukseen.

Virrankulutuksen suhteen tehtiin käytännön koe, jossa ultraäänilähettimen tilalle kytkettiin jälleen $2 \text{ k}\Omega$ vastuksen ja $2,2 \text{ nF}$ kondensaattorin rinnankytkentä. Paine- ja lämpötila-anturia ei kytketty. Toinen ledestä välähti aina lähetyksen ajan. Laitteeseen asetettiin 10440-kokoinen litiumioniakku, jonka kapasiteetiksi oli ilmoitettu 350 mAh . Toiminta-aikaa ei tarkasti mitattu, mutta ledi välähteli vielä noin 38 h kuluttua käynnistyksestä. Hieman myöhemmin toiminta oli pysähtynyt. Akun jännite oli tällöin noin $3,2 \text{ V}$. Oletettavasti se oli laskenut asetettuun 3 V jännitteeseen, mutta toipunut hieman virrankulutuksen laskiessa. Jännite oli samaa luokkaa vielä 12 h kuluttua eli lepotilassa kulutettu virta ei ole liian suuri alijännitesuojauksen kannalta. Akkua ei kuitenkaan ole syytä säilyttää laitteeseen kiinnitettynä.

7.2 Vahvistin- ja suodinkytkennän mittaukset

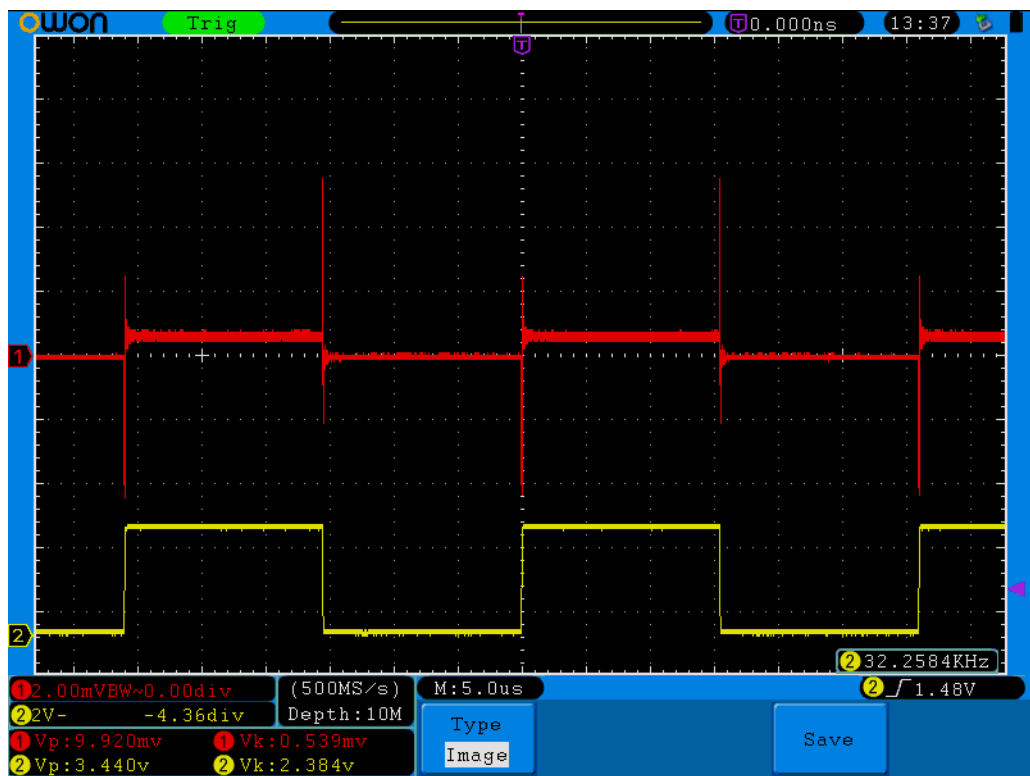
Vahvistin- ja suodinkytkennöille suunnitellut piirilevyt valmistutettiin teollisesti. Levyjen saavuttua koottiin neljä versiota. Levyille juotettiin kaikki komponentit, joille on merkitty näkyviin arvo kuvassa 5.13 sivulla 49. Yksi levyistä on esitetty kuvassa 7.5. Poiketen edellä esitetystä kytkentäkaaviosta, kuvassa nähdään lohkojen välillä olevat piikkirimat. Nämä lisättiin, jotta tarvittaessa voidaan testata yksittäisiä lohkoja. Kaikkien lohkojen ollessa käytössä ne yhdistetään toisiinsa oikosulkupaloilla. Lisäksi kytkentäkondensaattorin C_{11} paikalle päätettiin juottaa 10Ω vastus, koska kondensaattoria ei tarvita ultraäänivastaanottimen kanssa. Alustavan testauksen perusteella kaikki levyt toimivat normaalisti. Tämän jälkeen mitattiin, kuinka hyvin niiden ominaisuudet vastaavat suunniteltua.



Kuva 7.5 Vahvistin- ja suodinlevy.

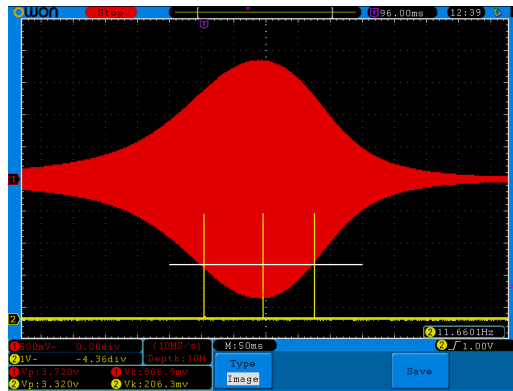
7.2.1 Taajuusvaste

Aluksi tutkittiin, kuinka hyvin vahvistin- ja suodinkytkeiden taajuusvasteet vastaavat suunniteltua. Kunnollisen signaaligeneraattorin puuttuessa kytkettiin käsillä olleen mikro-ohjainlevyn ulostuloon $1\ \Omega$ ja $4,7\ \text{k}\Omega$ vastusten muodostama jännitteenjakokytkentä, jota syötettiin $3,3\ \text{V}$ kantiaallolla. $1\ \Omega$ vastuksen yli oleva jännite syötettiin mitattavalle levyille $1\ \mu\text{F}$ kondensaattorin läpi. Kyseinen signaali oli kuvan 7.6 mukainen. Näkyvän kohinan vähentämiseksi tulos on 128 mittauksen keskiarvo. Kuvasta kantiaaltosignaalin suuruudeksi voisi arvioida noin $0,6\ \text{mV}_{p-p}$. Näin ollen perustaajuisen sinisignaalin amplitudi on noin $0,76\ \text{mV}_{p-p}$. Jotta taajuusvasteen voi mitata kytkennöille, joiden vahvistus on 5000, käyttöjännitteen arvoksi muutettiin $5\ \text{V}$. Samaa jännitettä käytettiin kaikille kytkennöille.

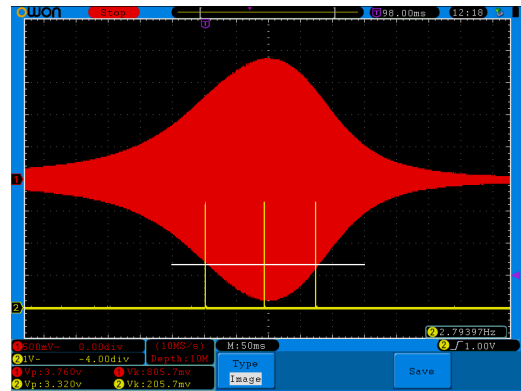


Kuva 7.6 Vahvistin- ja suodinlevyille syötetty testisignaali (yllä) ja mikro-ohjaimen ulostulo (alla).

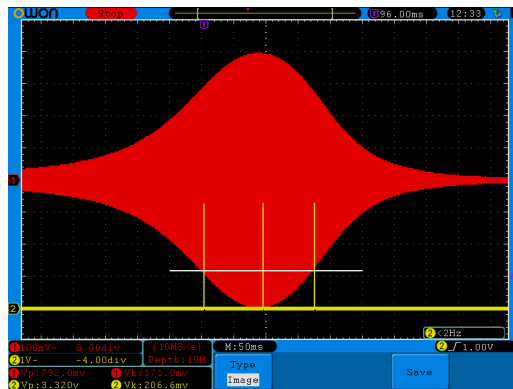
Signaali tuotettiin $48\ \text{MHz}$ taajuudella juoksevan laskuriyksikön avulla. Taajuutta kasvatettiin noin $23\ \text{kHz}$ taajuudesta noin $44\ \text{kHz}$ taajuuteen pienentämällä laskurin huippuarvoa yhdellä aina 50 jakson välein. Tästä johtuen alkupäässä taajuus muuttuu hitaammin. Mikro-ohjaimen toinen nasta nostettiin ylös taajuuden ollessa noin $30,3\ \text{kHz}$, $32,26\ \text{kHz}$ ja $34,3\ \text{kHz}$, mitkä ovat halutut $-3\ \text{dB}$ rajataajuudet ja keskitaajuus. Kyseinen nasta kytkettiin oskilloskoopin kanavaan 2 ja 1-kanavalla mitattiin vahvistin- ja suodinkytken ulostuloa. Tulokset on esitetty kuvassa 7.7.



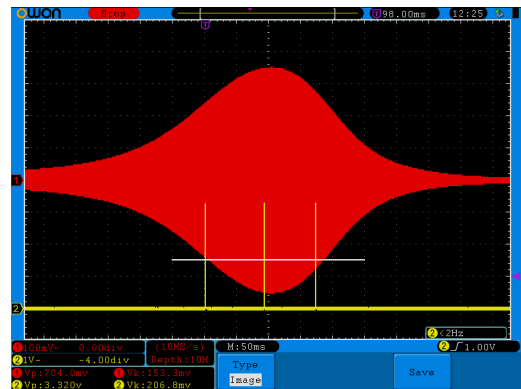
(a) AD8648, vahvistus 5000.



(b) TL974, vahvistus 5000.



(c) AD8648, vahvistus 1000.



(d) TL974, vahvistus 1000.

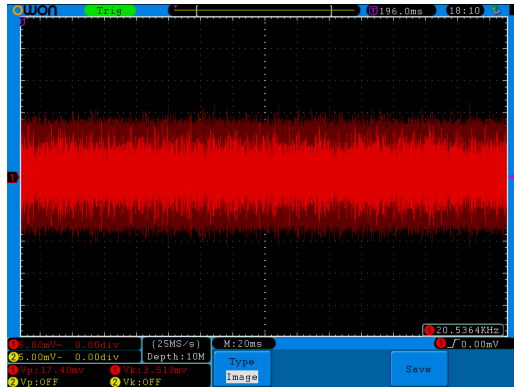
Kuva 7.7 Rakennettujen vahvistin- ja suodinlevyjen mitatut taajuusvasteet.

Kuvaan on piirretty valkoinen viiva -3 dB jännitteen kohdalle. Kuvan perusteella -3 dB rajataajuudet ja keskitaajuus osuvat kaikissa tapauksissa varsin lähelle suunniteltua. Jos sisäänmenosignaalin jännitettä 0,76 mV verrataan kuvissa näkyviin jännitteisiin, vahvistukset ovat noin 4890 (7.7(a)), 4950 (7.7(b)), 1040 (7.7(c)) ja 930 (7.7(d)). Näin ollen myös vahvistukset vastaavat hyvin suunniteltua. TL974-operaatiovahvistimeen perustuvilla kytkennöillä keskitaajuus asettuu hieman korkeammalle kuin oli suunniteltu, mikä voi suurelta osin johtua myös käytetystä 5 V käyttöjännitteestä. Datalehden [57, s. 5] mukaan sen yksikkövahvistuksen rajataajuus on tyypillisesti selvästi suurempi 5 V käyttöjännitteellä (17,3 MHz) kuin 2,7 V käyttöjännitteellä (8,4 MHz). Bessel-suotimen vastukset suunniteltiin pienemmän käyttöjännitteen mukaan. AD8648-operaatiovahvistimella erot ovat selvästi pienempiä (noin 21 MHz ja 24 MHz) [6, s. 9].

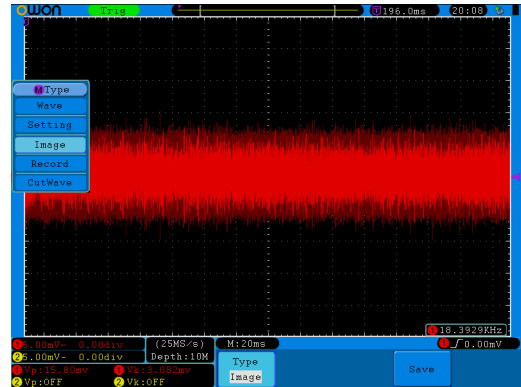
7.2.2 Kohina

Seuraavaksi testattiin, kuinka suuret kohinatasot kytkennöillä on. Levyjen käyttöjännitteeksi syötettiin 3,3 V jännite laboratorioteholähteellä. Kytkennän sisään-

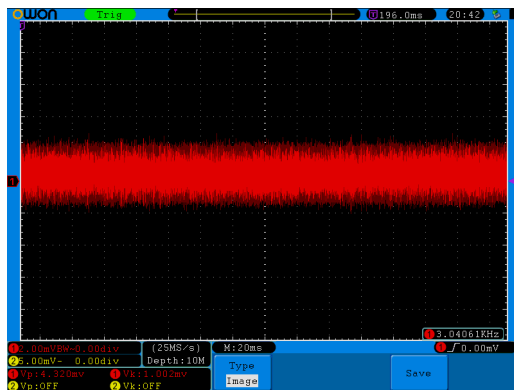
meno maadoitettiin 100 nF kondensaattorilla ja oskilloskoopilla mitattiin ulostuloa. Oskilloskoopissa oli käytössä *persist*-tila eli vanhat mittaukset säilyvät näytöllä haaleana ja uusimmat näkyvät hieman kirkkaampana. Ulostuloa mitattiin noin minuutin ajan ennen kuvan tallentamista. Tulokset olivat kuvan 7.8 mukaiset.



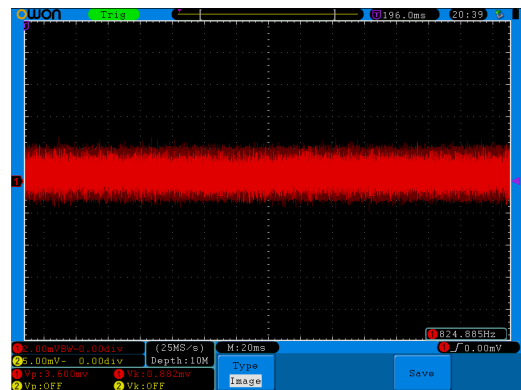
(a) AD8648, vahvistus 5000.



(b) TL974, vahvistus 5000.



(c) AD8648, vahvistus 1000.



(d) TL974, vahvistus 1000.

Kuva 7.8 Rakennettujen vahvistin- ja suodinlevyjen mitatut kohinat.

Kuten kuvasta nähdään, TL974-operaatiovahvistimeen perustuvien kytkentöjen kohina on hieman pienempi kuin AD8648-operaatiovahvistimeen perustuvilla kytkennöillä. 5000-kertaisen vahvistuksen omaavilla kytkennöillä (7.8(a) ja 7.8(b)) huipusta-huippuun -kohinajännite on pääsääntöisesti alle 20 mV_{p-p} . Vastaavasti 1000-kertaisen vahvistuksen omaavilla (7.8(c) ja 7.8(d)) kohina on alle 5 mV_{p-p} .

Sivulla 54 esitetty simulaatiotulos $2,7 \text{ mV}_{RMS}$ on pienempi kuin kuvassa 7.8(a) näkyvä oskilloskoopin mittaama kohinan tehollisarvo $3,519 \text{ mV}$. Tämä oli odotettavissa, sillä simulaatio ei huomioi esimerkiksi käyttöjännitteissä olevaa kohinaa. Kohinat mitattiin uudelleen, kun sisäänmenoon oli kytketty ultraäänivastaanotin 3 m pituisella RG174-koaksiaalikaapelilla. Erona edelliseen mittaukseen oli kaikilla vahvistin- ja suodinlevyillä noin $0,2\text{--}0,3 \text{ mV}$ suurempi kohinan tehollisarvo.

Taulukkoon 7.3 on merkitty edellisen alaluvun lopussa lasketut vahvistukset ja kuvasta 7.8 katsotut oskilloskoopin ilmoittamat kohinan tehollisarvot. Vahvistimelle on eduksi mahdollisimman suuri vahvistuksen ja kohinan suhde, jonka arvot on myöskin merkitty taulukkoon. Kyseinen suhde on heikoin TL974-operaatiovahvistimella toteutetulla vahvistimella, jonka vahvistus on noin tuhat. Näin ollen se toimii verrokkina alimmalla rivillä, jossa vahvistus-kohinasuhdetta on vertailtu kytkentöjen kesken. Vahvistus-kohinasuhde vaikuttaa vastaanotettuun signaali-kohinasuhteeseen. Näin ollen voidaan karkeasti arvioida, että TL974-kytkentöjen välillä kantamassa on 1,55-kertainen ero. Tosin pienemmällä signaalitasolla esimerkiksi AD-muunnoksen pienet epätarkkuudet ovat suhteessa suurempia. Selvää kuitenkin on, että viisinkertainen vahvistus ei takaa viisinkertaista kantamaa.

Operaatiovahvistin	AD8648		TL974	
Vahvistus	4890	1040	4950	930
Kohina (mV_{RMS})	3,5	1,0	3,1	0,9
Vahvistus/kohina	1397	1040	1597	1033
Vertailuluku	1,35	1,01	1,55	1,00

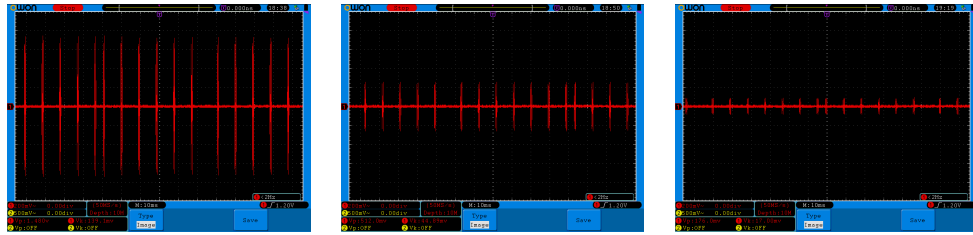
Taulukko 7.3 Vahvistin- ja suodinkytkennän eri versioiden vahvistuksen ja kohinan suhteet.

7.2.3 RF-suodatus

Lopuksi tutkittiin RF-suodatusten vaikutusta vahvistin- ja suodinkytkennän herkkyyteen GSM-signaalin aiheuttamille häiriöille. Kokeilu suoritettiin liikuttele-malla piirilevyn läheisyydessä matkapuhelinta, johon oli juuri puhelu saapumassa. Heti aluksi havaittiin, että ongelma ei ole lähellekään yhtä suuri kuin alustavissa kokeiluissa käytetyllä vahvistimella. Tällöin häiriö oli koko vahvistimen käyttö-jännitealueen suuruinen jo puhelimen ollessa noin metrin päässä vahvistimesta. Ultraäänivastaanotin oli liitetty kyseiseen vahvistimeen koaksiaalikaapelilla, jonka päästä tuli kuitenkin noin 5 cm pituiset ”hännät” tavallista johtoa, jotka liitettiin vahvistinlevyllä olleeseen piikkirimaan. Nyt tutkitussa versiossa ultraäänisignaali tuotiin vahvistin- ja suodinlevylle SMA-liittimen kautta, mikä vähentää häiriöiden kytkeytymistä.

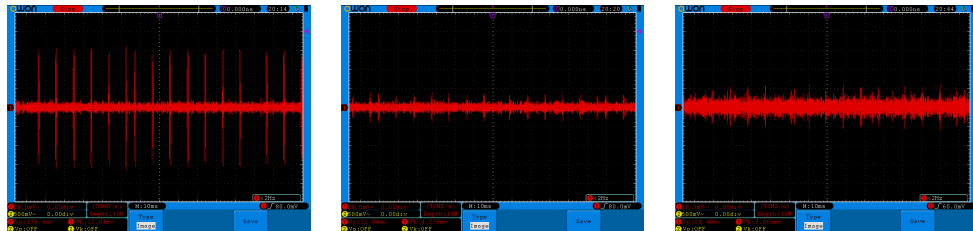
Kokeiluun otettiin ensin TL974-operaatiovahvistimeen perustuva kytkentä, jonka vahvistus on 5000. Levylle oli liitetty ultraäänivastaanotin 3 m RG174-kaapelilla ja käyttöjännitteenä oli 5 V. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 7.9. Tulokset saatiin, kun puhelin oli aivan piirilevyn vieressä, eli parannus alkutilanteeseen oli jo liitännöiden ja mahdollisesti hieman erilaisen piirilevyn ansiosta selvä. Kuviin pyritiin saamaan suurin mahdollinen häiriö, kun puhelinta liikuteltiin levyn lähellä.

GSM-tekniikkaan ei perehdytty tarkemmin, mutta ilmeisesti puhelin säätää lähetystehoa kuuluvuuden mukaan. Hetkittäin häiriö nimittäin voimistui suuremmaksi kuin kuvissa on esitetty. Näin ollen tulokset ovat lähinnä suuntaa antavia.



(a) Ei suodatuskondenssaattoreita. (b) Lisätty C_9 arvoltaan 33 pF. (c) Lisätty C_{10} arvoltaan 10 pF.

Kuva 7.9 Matkapuhelimen aiheuttama häiriö TL974-operaatiovahvistimeen perustuvassa kytkennässä erilaisilla RF-suodatuksilla.



(a) Ei suodatuskondenssaattoreita. (b) Lisätty C_9 arvoltaan 33 pF. (c) Lisätty C_{10} arvoltaan 10 pF.

Kuva 7.10 Matkapuhelimen aiheuttama häiriö AD8648-operaatiovahvistimeen perustuvassa kytkennässä erilaisilla RF-suodatuksilla. Huomaa pienempi jänniteskaala verrattuna kuvaan 7.9.

Aluksi häiriöjännitteen huippuarvo oli noin 700 mV. Kondensaattorin C_9 lisäämisen jälkeen se laski arvoon 250 mV ja kondensaattorin C_{10} lisäyksen jälkeen edelleen arvoon 100 mV. Tulosten perusteella kondensaattorien lisääminen parantaa häiriön sietoa. Tämän jälkeen lisättiin kondensaattorien C_4 , C_6 , C_8 ja C_{12} paikoille ensin 33 pF kondensaattorit ja lopuksi niiden rinnalle vielä 10 pF kondensaattorit, mutta mittaustuloksissa ei havaittu enää merkittävää parannusta. Ulostuloon ja maahan liitettiin noin 20 cm pituiset johdot, joita ei toisessa päässä liitetty mihinkään. Tämänkään ei havaittu vaikuttavan häiriöön.

Seuraavaksi suoritettiin vastaavat mittaukset AD8648-operaatiovahvistimeen perustuvalla kytkennällä samalla vahvistuksella. Tulokset on esitetty kuvassa 7.10. Tällä kytkennällä häiriö oli jo lähtökohtaisesti huomattavasti pienempää kuin TL974-operaatiovahvistimeen perustuvalla kytkennällä. Myös alustavissa kokeiluissa käytetty vahvistin pohjautui TL974-operaatiovahvistimeen. On syytä huomioda, että kuvissa 7.10(a) ja 7.10(b) jänniteskaala on ainoastaan 20 mV/div, kun

kuvassa 7.9 se on 200 mV/div. Kuvassa 7.10(c) jänniteskaala on muutettu vielä pienemmäksi: 10 mV/div. Häiriöjännitteet olivat arvoiltaan noin 60 mV, 20 mV ja 10 mV. Tälle kytkennälle ei testattu muiden kondensaattorien lisäyksen vaikutusta.

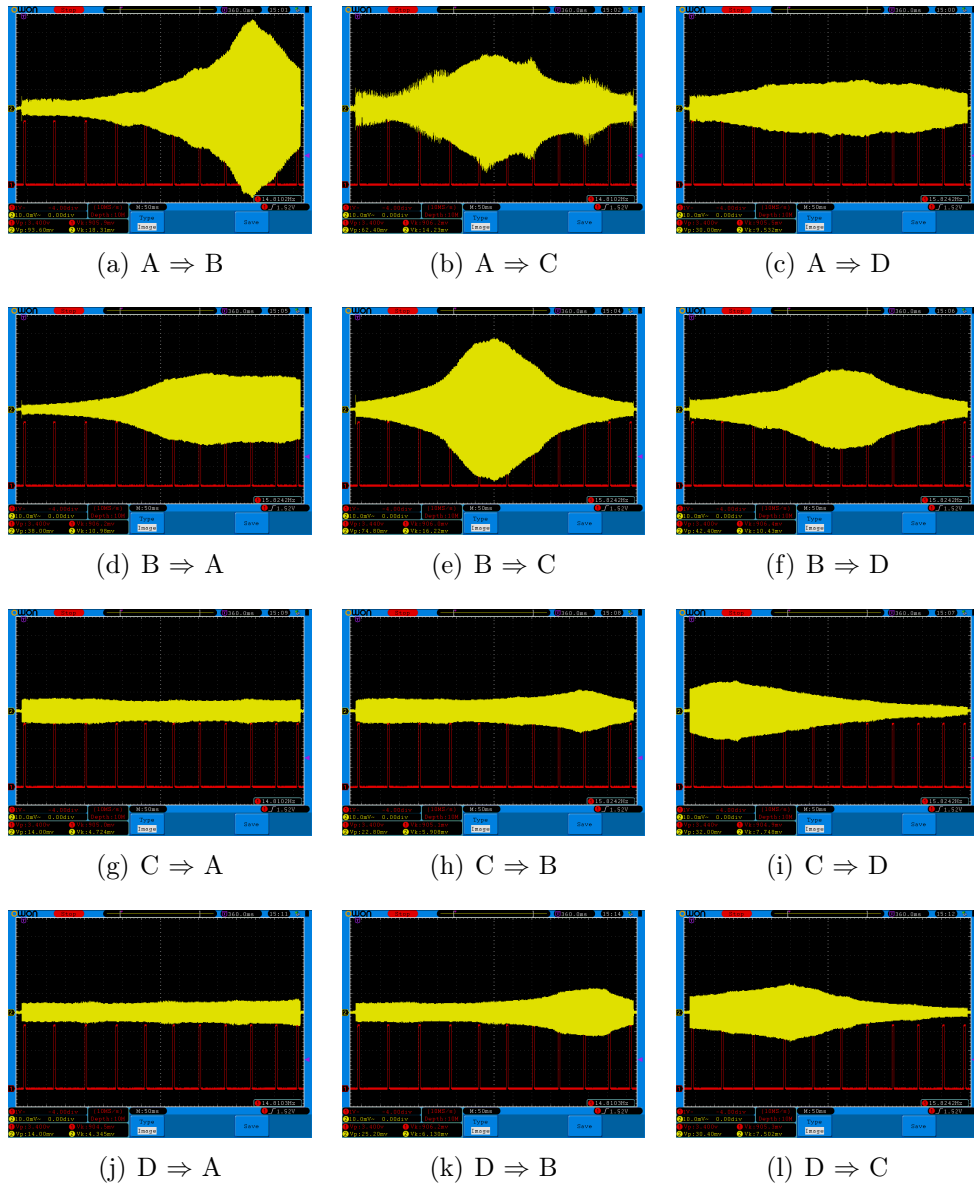
Mittausten perusteella voidaan todeta, että sisäänmenoon asennetut suotimet auttavat matkapuhelimen aiheuttamiin häiriöihin. Muiden suotimien merkitys oli vähäinen. Häiriöt tuskin aiheuttavat ongelmia käytännössä ellei puhelin ole aivan kytkennän vieressä.

7.3 Ultraäänilähettimien ja -vastaanottimien mittaukset

Ultraäänilähettimien ja -vastaanottimien välistä yhteyttä ilmassa päätettiin mitata ja verrata sivulla 31 esitettyihin arvoihin. Mittaukseen otettiin neljä pietsosähköistä muunninta, jotka merkittiin kirjaimilla A, B, C ja D. Jokaisen kanssa rinnan juotettiin 47 k Ω vastus, joka oli paikallaan sekä muuntimen toimiessa lähettimenä että vastaanottimena. Lähetys testattiin kaikkien yhdistelmien välillä molempiin suuntiin. Lähettimen ja vastaanottimen välimatka oli 10 cm. Lähetintä syötettiin ± 24 V kantiaallolla, jonka ensimmäisen harmonisen sinikomponentin amplitudi on tällöin noin 30 V eli noin 21,2 V_{RMS}. Taajuutta muutettiin välillä 38–43 kHz. Tulokset on esitetty kuvassa 7.11. Pikkukuvien kuvateksteissä nuolen vasemmalle puolelle merkitty muunnin toimi lähettimenä ja oikeanpuoleinen vastaanottimena.

Sivulla 31 esitetyillä arvoilla ja niille tehdyillä oletuksilla voidaan alaluvun 4.3.2 kaavojen avulla laskea, mitä vastaanotetun jännitteen tulisi olla. Lähetetty äänenpaine 10 cm etäisyydellä on kaavojen (4.17) ja (4.21) mukaan noin 133 dB re 20 μ Pa. Jos ilmoitettu vastaanottimen herkkyys -65 dB muunnetaan yksikköön dB re V/20 μ Pa, sen arvoksi saadaan -139 dB. Tällöin kaavan (4.23) mukaan jännitteen pitäisi olla 40 kHz taajuudella noin 500 mV_{RMS}.

Kuten kuvista nähdään, käytännössä ei päästä lähellekään tätä. Joko arvot on ilmoitettu yläkanttiin tai niiden referenssietäisyydet ja -painetasot eivät vastaa oletettuja. Lisäksi kuvista voidaan havaita, että muuntimien taajuusvaste vaihtelee selvästi yksilöiden välillä. Kuvan 7.11(a) perusteella A:n sarja- ja B:n rinnakkaisresonanssitaajuudet osuvat noin 42 kHz kohdalle. Vastaavasti kuvan 7.11(e) mukaan B:n sarja- ja C:n rinnakkaisresonanssitaajuudet osuvat noin 40 kHz taajuudelle. Nyt C:n sarja- ja A:n rinnakkaisresonanssitaajuudet ovat varsin kaukana toisistaan ja A:n tuottama jännite on tasaisen heikko, mikä nähdään kuvassa 7.11(g).



Kuva 7.11 Ultraäänivastaanottimien ulostulojännite kanavalla 2. Kanavan 1 piikit ilmaisevat taajuuudet 500 Hz välein.

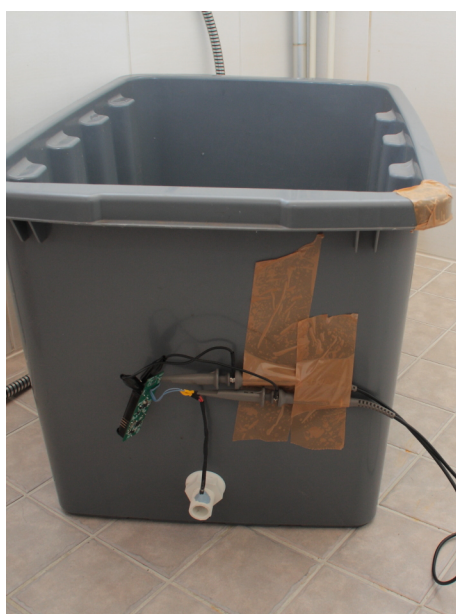
7.4 Nopeusmittausten käytännön kokeet

Nopeuden, eli käytännössä virtauksen, mittaukseen tutkittiin Pitot-putkeen ja termiseen mittaukseen perustuvia tekniikoita. Pitot-putken paine-eron mittaukseen käytettiin MP3V5004-differentiaalista paineanturia. Kokeiluita varten toteutettiin alaluvussa 6.4 sivulla 63 esitetty ohjelma. Termistä mittausta tutkittaessa käytännön kokeisiin valittiin kolme eri termistoria, jotka esiteltiin sivulla 38. Kokeita varten toteutetun ohjelman toiminta esitettiin alaluvussa 6.3 sivulla 62. Seuraavissa alaluvuissa esitellään käytännön kokeiden tulokset.

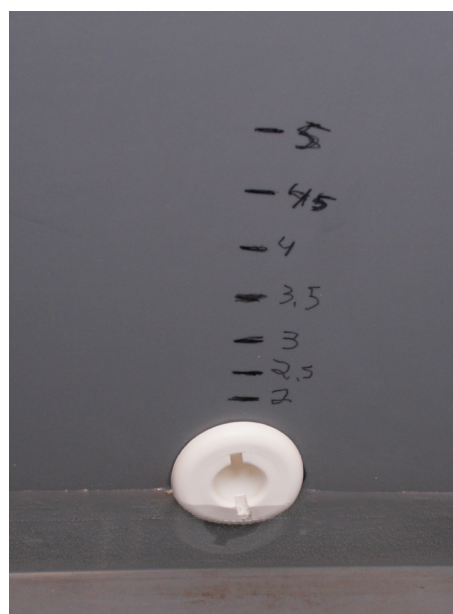
7.4.1 Terminen mittaus

Termistä virtausmittausta testattiin käyttäen apuna vesisäiliötä, jonka alaosassa oli lyhyt ulostuloputki. Putkessa virtaavan veden nopeus riippuu Torricellin lain mukaan veden korkeudesta säiliössä. Termistori asetettiin kyseiseen putkeen. Nopeuden määrittämiseksi säiliön sisäpintaan merkittiin viivat korkeuksille, jotka vastasivat virtausnopeutta välillä 2–5 km/h. Merkinnät tehtiin 0,5 km/h välein. Ohjelmassa termistorin lämpötilaksi asetettiin noin 45°C. Oskilloskoopilla mitattiin ajastimen *TIM1* kanavan 2 ulostulon pulssinleveyttä. Kyseinen ulostulo tarjosi suodatetun version termistorille syötettävästä signaalista. Oskilloskoopin näytöltä pulssinleveys voitiin lukea mikrosekunnin tarkkuudella.

Mittausta varten säiliö täytettiin vedellä hieman 5 km/h viivaa korkeammalle, minkä jälkeen mitattiin veden lämpötila. Veden virratessa pois säiliöstä pulssinleveys merkittiin mittauspöytäkirjaan aina vedenpinnan ollessa tiettyä nopeutta vastaavan merkkiviivan kohdalla. Mittaus toistettiin viisi kertaa kolmessa eri lämpötilassa. Mittausjärjestelyt on esitetty kuvissa 7.12(a) ja 7.12(b).



(a) Säiliö.

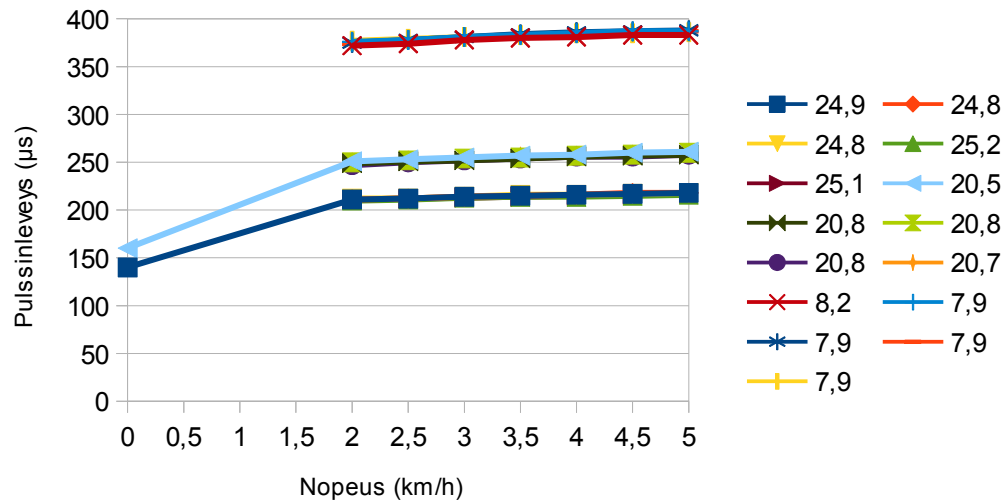


(b) Merkinnät.

Kuva 7.12 Termisen virtausmittauksen koejärjestelyt.

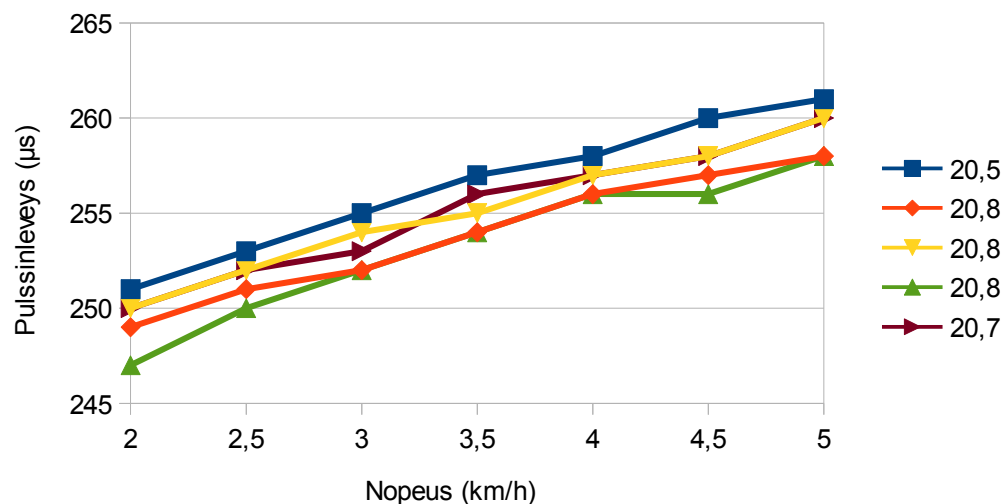
NTCLE100E3102GB0- ja NTCASCWE3102J-termistoreiden lämpötilaa ei voitu nostaa alle 10°C vedessä kuin noin 10°C. Näin ollen niiden osalta mittauksia ei enempää suoritettu. 1K2A1-termistorin kanssa kyseistä ongelmaa ei ollut, joten sille suoritettiin mittaukset veden lämpötiloissa 8°C, 21°C ja 25°C. Tulokset on esitetty kuvassa 7.13. Kuten kuvasta nähdään, mittauksen herkkyyks on varsin heikko.

Sinänsä selkeä muutos pulssinleveydessä on kuitenkin havaittavissa. Suurimman ja pienimmän nopeuden välillä muutos oli noin $10\ \mu\text{s}$.



Kuva 7.13 Terminen virtausnopeuden määrittäminen eri veden lämpötiloissa.

Kuvassa 7.14 on nähdään tulokset tarkemmin lämpötilaltaan 21°C veden osalta. Siitä nähdään, että esimerkiksi sama $256\ \mu\text{s}$ pulssinleveys on mitattu nopeuksilla $3,5\text{--}4,5\ \text{km/h}$. Lisäksi voidaan havaita jo muutaman asteen kymmenyksen verran kylmemmässä vedessä pulssinleveyden kasvavan selvästi. Suuren lämpötilariippuvuuden vuoksi lämpötila tulisi pystyä mittaamaan erittäin tarkasti ja pienellä viiveellä. Näin ollen vaikuttaa haastavalta saada terminen mittaus toteutettua niin, että asetetut tavoitteet täytettäisiin.



Kuva 7.14 Terminen virtausnopeuden määrittäminen 21°C vedessä.

Suoritettujen mittausten mittausepävarmuus on kuitenkin varsin suuri. Mittaushetki arvioitiin silmämääräisesti vedenpinnan laskiessa viivan kohdalle ja käytetyn

lämpömittarin tarkkuudesta ei ole tietoa. Myöskään ei ole tietoa siitä, millä periaatteella oskilloskooppi mittaa ilmoittamansa pulssinleveyden. Sen suhteen olisi saatu ainakin paremmalla resoluutiolla oleva tieto, jos mittauksessa käytettyyn kytkentään olisi lisätty näyttö, jolle mikro-ohjain olisi voinut tulostaa mittaamansa pulssinleveyden. Mikro-ohjaimen laskuri toimi 48 MHz taajuudella, joten tulos olisi tällöin saatu $1/48 \mu\text{s}$ resoluutiolla.

Termisen mittauksen huonona puolena voidaan pitää myös suurta virrankulutusta. Tässä tapauksessa syötetty teho noin 25°C lämpötilaerolla oli noin 290 mW. Huomioiden hakkurin hyötysuhteen, virrankulutus 3,6 V jännitteellä on karkeasti 10 mA. Näin ollen anturin keskimääräinen virrankulutus lähes kaksinkertaistuisi termistä mittausta käytettäessä.

7.4.2 Pitot-putki

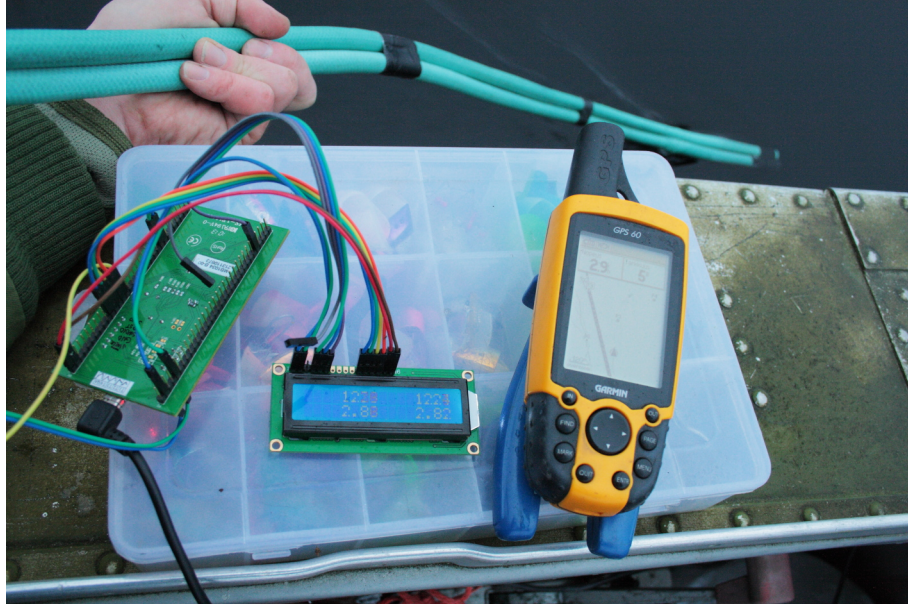
Pitot-putkeen perustuvaa virtausmittausta testattiin puutarhaletkuilla toteutetulla rakennelmalla. Kaksi letkua liitettiin teipin avulla rinnakkain. Toisen letkun pää oli avoin ja toinen suljettu. Suljetun letkun kylkeen porattiin reikiä noin 5 cm päähän letkun suulta. Avoimella letkulla voitiin siis mitata kokonais- ja suljetulla staattista painetta. Letkujen toiseen päähän liitettiin ohuimmat letkut MP3V5004-anturia varten. Liitokset tiivistettiin teipillä. Kokeessa letkut laskettiin veteen veneen vierellä ja pyrittiin pitämään niin, että ne olivat virtauksen suuntaisesti. Jos letkut laskettiin vähänkään syvemmälle, ne pyrkivät kääntymään hieman pystyyn huolimatta siitä, että ne olivat ajan saatossa kovettuneet. Tällöin nopeuslukema nousi reilusti johtuen ilmeisesti siitä, että avoimen letkun pää oli selvästi suljetun letkun reikiä syvemmällä, jolloin hydrostaattinen paine sen suulla oli suurempi.

Kun letkuja pidettiin aivan pintakalvon alla, saatiin odotetun suuruisia lukemia verrattuna GPS-laitteen lukemaan. Lukemat on esitetty taulukossa 7.4. Lukemia tarkkailtiin noin 200 m matkalla neljään eri suuntaan. Taulukkoon on merkitty alue, jolla lukemat pääsääntöisesti vaihtelivat. Hetkellisiä heittoja saattoi olla niin GPS:n kuin Pitot-putken lukemissa. Pitot-putken lukema on liukuva keskiarvo noin 6,4 s ajalta. Oletettavasti myös GPS-laitteessa oli käytössä useiden sekuntien keskiarvoistus. Tuulen nopeus oli noin 2 m/s. Koejärjestely on esitetty kuvassa 7.15.

Taulukon 7.4 tulokset vaikuttavat oikeansuuntaisilta ja osuvat oletettavasti asetettujen tarkkuusvaatimusten sisään. Vastatuuleen Pitot-putken antama lukema on suurempi verrattuna GPS-laitteen lukemaan ja myötätuuleen päinvastoin. Tämä vaikuttaa todenmukaiselta, sillä veden pinnalla on tuulensuuntainen virtaus. Jostain syystä ero oli vastatuuleen 0,3 km/h ja myötätuuleen ainoastaan 0,1 km/h. On mahdollista, että Pitot-putkelta saatu lukema oli kaikissa tapauksissa noin

Suunta	GPS km/h	Pitot km/h
Poikkituuleen 1	2,2	2,1–2,3
Poikkituuleen 2	2,4	2,5–2,6
Vastatuuleen	2,2	2,5
Myötätuuleen	2,5	2,4

Taulukko 7.4 GPS-laitteella ja Pitot-putkella mitatut nopeudet.



Kuva 7.15 Pitot-putkeen perustuvan virtausmittauksen koejärjestely.

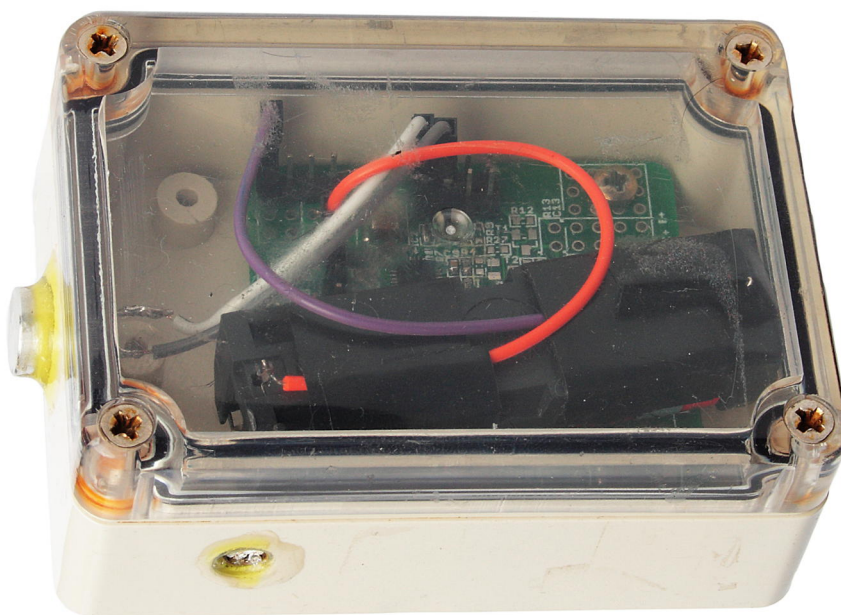
0,1 km/h liian suuri. Kokonaisuutenakin Pitot-putken ja GPS-laitteen lukemat vastaisivat vielä paremmin toisiaan, jos Pitot-putken lukemista vähennettäisiin kyseinen 0,1 km/h.

Seuraavaksi Pitot-putkesta pyrittiin rakentamaan pienempi malli, jota voitaisiin myöhemmin käyttää veden alle upotettuna. Prototyyppi koottiin muovisen sähköputken sisään ja MP3V5004-anturi sekä siihen liittyvät letkut täytettiin silikoniöljyllä vedeltä suojaamiseksi. Valitettavasti kyseisellä mallilla ei saatu luotettavia mittaustuloksia vaan sen antamat lukemat vaihtelivat satunnaisesti laajalla alueella. Mahdollisesti syiksi arvioitiin anturiin jääneet ilmakuplat tai anturin vaurioituminen öljyn lisäämisen yhteydessä. Vaikka öljy pysyikin ohuiden letkujen sisällä pintajännityksen vuoksi kokeen ajan, niin kyseinen suojausmenetelmä tuskin toimisi pidempiaikaisessa käytössä käytännön olosuhteissa. Näin ollen tätä aihetta ei tutkittu enempää.

7.5 Järjestelmän käytännön kokeet

Järjestelmää testattiin käytännön olosuhteissa kolmena päivänä yhteensä noin 12 h ajan. Ensimmäisenä päivänä käytössä oli tässä työssä esiteltyä vahvistin- ja suodinkytkeä edeltävä versio, jonka vahvistus oli hieman alle 1000 ja kohina hieman suurempi. Muutoin kytkentä oli pitkälti samanlainen. Lisäksi silloisessa näyttölaitteen ohjelmistossa oli puute, joka käytännössä rajoitti maksimikantamaksi noin 30 m. Kyseisissä mittauksissa voitiin kuitenkin todeta syvyys- ja lämpötilamittausten toimivan odotetusti. Lämpötilamittauksia ei todennettu verrokki-mittarilla, mutta olosuhteiden perusteella tulosten uskottiin olevan datalehden esittämissä rajoissa.

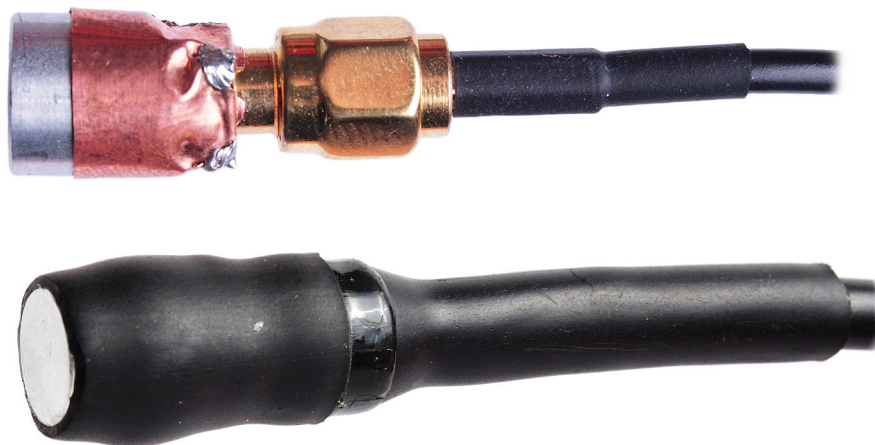
Käytännön kokeissa anturissa käytettiin ensimmäistä piirilevyversiota. Paine- ja lämpötila-anturina toimi MS5541C. Se ja ultraäänilähetin asetettiin vedenpitävään koteloon porattuihin reikiin ja kiinnitettiin paikalleen epoksiliimalla. Kotelo on esitetty kuvassa 7.16. Varsinaista kalastuskäyttöä ajatellen se on aivan liian suuri ja vaati upotusta varten reilusti painoja sekä aiheutti merkittävän vetovastuksen. Kotelo soveltui kuitenkin hyvin käytännön kokeisiin, joissa testattiin mittausten ja tiedonsiirron toimintaa.



Kuva 7.16 Anturin kotelointi käytännön kokeissa.

Näyttölaitteeseen liitettävä ultraäänivastaanotin juotettiin SMA-liittimeen ja suojattiin kuparifoliolla häiriöitä vastaan. Radiotaajuisia häiriöitä ei tosin veden alla juurikaan ole, mutta suojaus lisättiin mahdollisesti ilmassa suoritettavia kokeita ajatellen. Tämän jälkeen koaksiaalikaapeli liitettiin paikalleen. Vastaanottimen

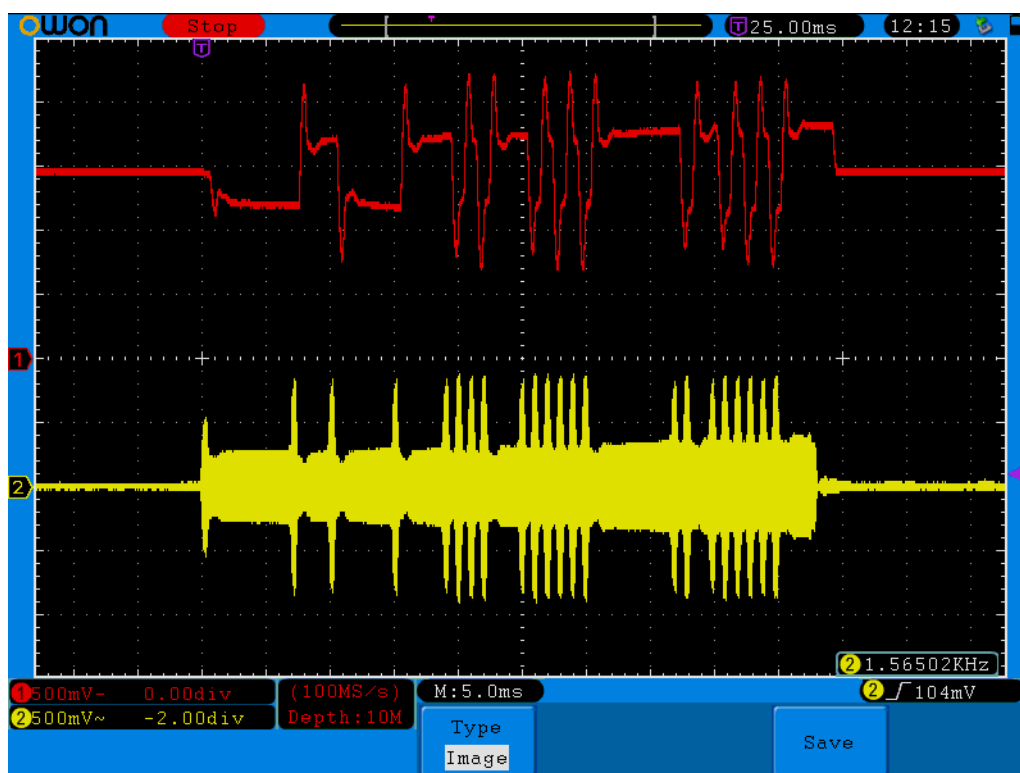
toinen jalka oli yhteydessä alumiinikuoreen, joten kyseinen jalka liitettiin häiriö-suojaan ja koaksiaalikaapelin vaippaan. Lopuksi tehdyt liitokset suojattiin muutamalla eri kokoisella liimallisella kutistesukalla. Vastaanotin ennen ja jälkeen kutistesukkien lisäämisen on esitetty kuvassa 7.17.



Kuva 7.17 Ultraäänivastaanottimen suojaus käytännön kokeita varten.

Ensimmäisessä kokeessa anturi kiinnitettiin takilavaijeriin ja laskettiin veteen. Ultraäänivastaanotin roikkui johtonsa varassa takilavaijerin vierellä. Koe suoritettiin heikkotuulisena päivänä ajelehtivasta veneestä hieman yli 20 m syvyydessä vedessä. Anturin syvyys määritettiin takilan kelan kierrosten perusteella. Aiemmin on mitattu, että 31 kierrosta vastaa varsin tarkasti 10 m matkaa. Tähän toki hieman vaikuttaa, kuinka vaijeri on kelalle puolautunut. Kokeen perusteella mitattu syvyys vastasi todellista syvyyttä hyvin. Virheen arvioitiin olevan enintään ± 20 cm. Tämä vastaa datalehdellä [41, s. 5] esitettyä painemittauksen ± 2 kPa virhemarginaalia.

Näissä mittauksissa tiedonsiirto tapahtui pystysuunnassa. Tämän vuoksi voitiin useaan otteeseen havaita heijastusten vaikutus vastaanotettuun signaaliin. Kuvassa 7.18 on esitetty, kuinka signaali häipyi heijastuksen vuoksi. Kyseisessä tilanteessa anturi oli noin 5 m syvyydessä. Ultraäänivastaanotin oli noin 30 cm syvyydessä, mutta tarkka etäisyys pintaan vaihteli laineiden vuoksi. Vahvistimen ulostulossa näkyvä ensimmäinen piikki on signaalin normaalitaso ilman heijastuksen vaikutusta. Pinnasta saapuvan heijastuksen aiheuttaman destruktiivisen interferenssin vuoksi taso laskee kuitenkin alemmaksi hetken kuluttua. Kun lähetetyn signaalin vaihe muuttuu, sen ja heijastuksen välillä vaikuttaa hetken aikaa konstruktivinen interferenssi, josta muodostuu kuvassa näkyvät korkeammat piikit. Tässä tapauksessa signaalin taso on ollut koko ajan riittävä, joten kyseinen paketti vastaanotettiin onnistuneesti. Signaalin tason ollessa matalampi tai destruktiivisen interferenssin voimakkaampaa tiedonsiirtoon voi kuitenkin aiheutua virheitä.



Kuva 7.18 Signaalin häipyminen pinnasta tapahtuvan heijastuksen vuoksi. Yllä Costasin silmukan ja alla vahvistimen ulostulo.

Lopuksi kokeita suoritettiin kahtena peräkkäisenä päivänä käyttäen näyttölaitteen ja vahvistimen viimeisimpiä laitteisto- ja ohjelmistoversioita. Vahvistin- ja suodinkytkenästä kokeiltiin kaikkia suunniteltuja versioita. Kokeissa testattiin lähinnä tiedonsiirron toimintaa, kun anturia vedettiin veneen perässä. Tuuliolosuhteet muuttuivat sopivasti päivien välillä. Ensimmäisenä päivänä sää oli lähes tyyni ja seuraavana päivänä tuulen nopeus oli noin 5 m/s. Näin ollen tuloksia saatiin säätilan suhteen erilaisissa olosuhteissa. Kokeita suoritettiin alueella, jolla veden syvyys vaihteli pääsääntöisesti 15–25 m välillä. Anturi kiinnitettiin siimaan ja sen syvyyttä säädeltiin painotuksella sekä nopeudella. Syvyys oli enimmillään noin 20 m. Ultraäänivastaanottimen johto kiinnitettiin takilan laukaisijaan nippusiteellä niin, että itse vastaanotin roikkui noin 50 cm laukaisijan takana. Vastaanotin oli kokeiden aikana noin 30–60 cm syvyydessä. Koejärjestelyt nähdään kuvassa 7.19.

Saatujen tulosten perusteella tiedonsiirrolle asetetut tavoitteet saavutettiin hyvin. Ainoastaan anturin ollessa hyvin lähellä pintaa yhteyden kanssa oli ongelmia. Tyynellä säällä anturia vedettiin noin 30 m etäisyydellä aivan pintakalvon alla. Tällöin yhteys toimi hetkittäin useiden sekuntien ajan, mutta välissä oli jopa kymmenien sekuntien pituisia katkoksia. Koetta ei toistettu kovemmalla tuulella. Kun anturi oli yli metrin syvyydessä, yhteys toimi pääsääntöisesti ilman katkoksia. Niitä ilmeni lähinnä jyrkemmissä käänöksissä, jolloin ultraäänilähettimen ja

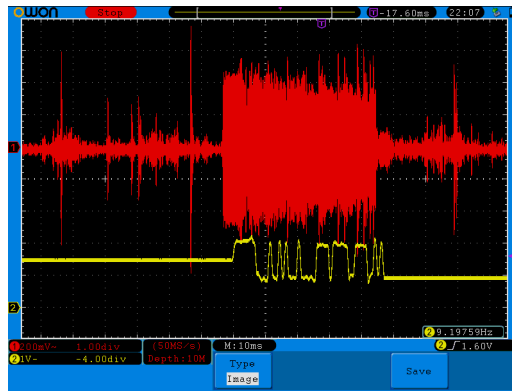


Kuva 7.19 Koejärjestely käytännön olosuhteissa suoritetuissa kokeissa.

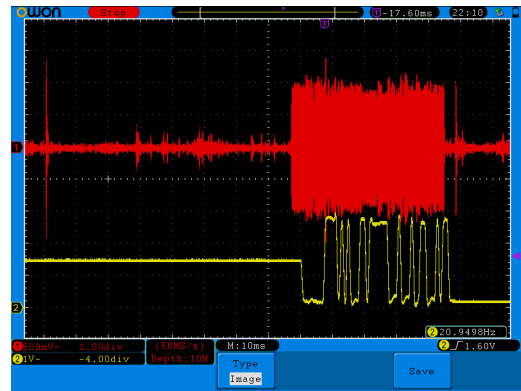
-vastaanottimen välinen kulma muuttui. Heijastuksista ei juurikaan havaittu olevan haittaa. Hyvin satunnaisesti, lähinnä tuulisella ilmalla tai anturin ollessa erittäin syvällä, signaaleissa oli havaittavissa kuvaa 7.18 vastaavia aaltomuotoja.

Ultraäänilähettimien ja -vastaanottimien toimintaa veden alla ei tutkittu yhtä laajasti kuin ilmassa alaluvussa 7.3. Tässä tyydyttiin ainoastaan vertailemaan lyhyesti kahta eri vastaanotinta lähettimen pysyessä samana. Tulos on esitetty kuvassa 7.20. Siitä nähdään, että kuvan 7.20(a) vastaanottimen vahvistettu ulostulojännite on ainoastaan noin puolet kuvan 7.20(b) vastaanottimeen verrattuna. Yksilöiden välisiä eroja vaikuttaisi siis olevan myös veden alla. Vertailussa käytettiin AD8648-operaatiovahvistimeen perustuvaa vahvistin- ja suodinkytkentää, jonka vahvistus on noin 5000. Etäisyys anturille oli noin 50 m ja anturin syvyys 7–8 m. Muissa esiteltävissä tuloksissa vastaanottimena on toiminut tässä vertailussa paremman tuloksen tuottanut.

Kuvassa 7.20 voidaan nähdä häiriöitä vastaanottimen ulostulossa. Näiden todettiin aiheutuvan ympäristön melusta kuten moottorin äänestä, alumiiniveneen ”räminöistä” ja aaltojen aiheuttamista kolahduksista veneen kyljissä. Kun vene kellui tyynessä vedessä moottori sammutettuna, vahvistimen ulostulossa näkyi pitkälti kuvaa 7.8 vastaavat kohinasot. Vaikka vahvistin- ja suodinkytkentä vaimentaakin häiriöiden alkuperäisen taajuuden, sekä ultraäänivastaanotin että vahvistin kuitenkin resonoivat näiden vaikutuksesta resonanssitaajuuksillaan. Mittauksissa jäi tutkimatta, vastaako häiriöiden taajuus lähinnä vastaanottimen sarjaresonanssitaajuutta vai vahvistin- ja suodinkytkennän keskitaajuutta.

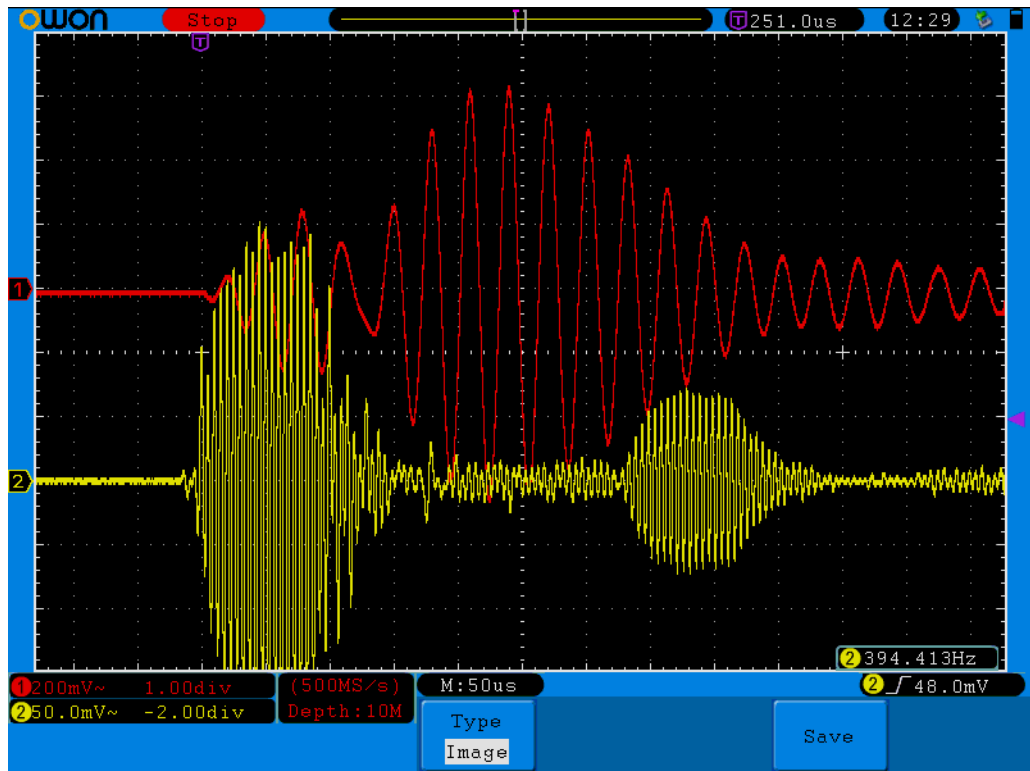


(a) Ulostulon amplitudi alle 500 mV.



(b) Ulostulon amplitudi noin 1 V.

Kuva 7.20 Ultraäänivastaanottimien vertailu veden alla. Yllä vahvistimen ja alla Costasin silmukan ulostulo. Huomioi vahvistimen ulostulon erisuuruiset jänniteskaalaukset.



Kuva 7.21 Kaikuluotaimen aiheuttama häiriö. Yllä vahvistin- ja suodinkytkennän, alla esivahvistimen ulostulo.

Toinen häiriötekijä on kaikuluotaimen signaali. Kuvan 7.21 alempi aaltomuoto on mitattu esivahvistimen ulostulosta. Siinä näkyy ensin kaikuluotaimen noin 200 kHz taajuudella lähettämä signaali ja hetken kuluttua oletettavasti pinnasta tapahtuva heijastus. Signaalin amplitudi on lähes 200 mV, joten vastaanottimen ulostulojännite on ollut suurempi kuin aiemmin (s. 48) mitattu noin 3 mV_{p-p}. Syynä voi olla vastaanottimien yksilölliset erot ja vastaanottimen erilainen sijainti kaiku-

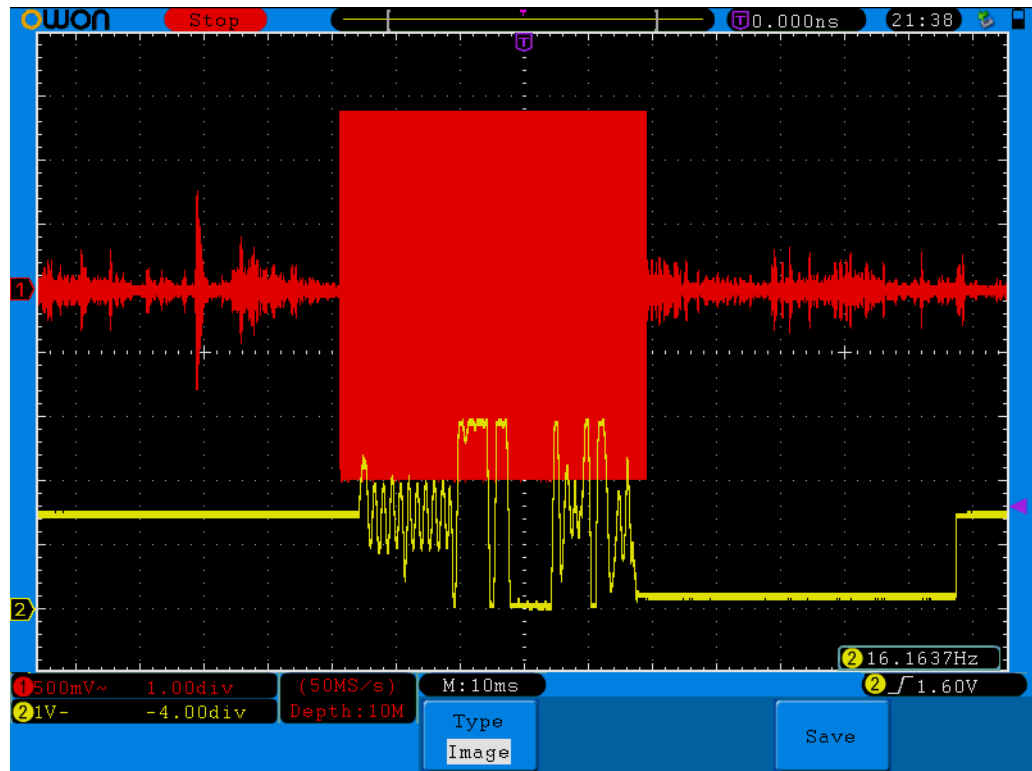
luotaimen anturiin nähden. Noin 20 m syvyydessä vedessä pohjasta saapuva kaiku oli hyvin heikko. Kaikuluotaimen havaittiin lähettävän tätä signaalia noin 70 ms välein. Kyseinen väli tosin riippuu syvyydestä. Ylempi aaltomuoto esittää vahvistin- ja suodinkytken (AD8648, vahvistus 5000) ulostulon. Siinä näkyvä taajuus on jälleen vastaanotettavan kanta-aallon taajuusalueella. Kaikuluotaimen aiheuttama häiriö on kuitenkin lyhytkestoinen suhteessa yhden bitin keston. Näin ollen tästä ei havaittu aiheutuvan merkittävää haittaa tiedonsiirrolle. Costasin silmukan ulostulossa oli kuitenkin nähtävissä pieni muutos häiriön vuoksi. Virheitä voi syntyä, jos vastaanotettu signaali on riittävän heikko ja kaikuluotaimen häiriö tapahtuu samaan aikaan kuin bitin tila luetaan. Kaikuluotaimen vaikutusta tiedonsiirtoon ei valitettavasti pystytty tutkimaan laajemmin, sillä kaikuluotaimen akku oli huonokuntoinen, minkä vuoksi luotaimen toiminta-aika rajoittui pariinkymmeneen minuuttiin.

Vahvistin- ja suodinkytken eri versioiden välillä ei havaittu merkittäviä eroja käytännön toiminnan suhteen, koska edellä esitetyt häiriöt vahvistuivat samassa suhteessa hyötysignaaliin nähden. Sekä 1000- että 5000-kertaisen vahvistuksen omaavilla kytkennöillä saatiin tyynellä ilmalla siirrettyä suurin osa paketeista onnistuneesti vielä 150 m matkalta. Signaalintunnistimen raja-arvoa muutettiin riippuen käytetystä vahvistuksesta. Kun käytettiin vahvistin- ja suodinkytkeä, jonka vahvistus oli 1000, tunnistimen raja-arvo asetettiin niin, että se reagoi signaaliin, jonka AD-muunnoksen amplitudi on vähintään 20. Kun vahvistus oli 5000, raja-arvoksi asetettiin 100. Näillä arvoilla virheellisiä tunnistuksia ilmeni ainakin tyynellä ilmalla pääasiassa harvemmin kuin kerran kymmenessä sekunnissa.

Suurin etäisyys, jonka yli paketteja siirrettiin tyynellä säällä, oli noin 220 m. Tällöin käytettiin AD8648-operaatiovahvistimeen perustuvaa kytkentää, jonka vahvistus oli 5000. Paketteja vastaanotettiin onnistuneesti muutama kappale noin 30 s aikana. Anturi oli tällöin noin 20 m syvyydessä ja lähestyttiin matalampaa vettä, joten koe jouduttiin keskeyttämään tässä vaiheessa. Todennäköisesti oltiin kuitenkin jo kantaman äärirajoilla. Koetta ei toistettu tuulisempana päivänä. Vahvistin- ja suodinkytkennoille, joiden vahvistus on 1000, ei kokeiltu tiedonsiirtoa yli 150 m matkalta, mutta oletettavasti näilläkin olisi voitu saavuttaa vastaava etäisyys.

Suuresta vahvistuksesta havaittiin olevan jopa haittaa lyhyillä etäisyyksillä. Tästä esimerkki on esitetty kuvassa 7.22, jossa vahvistimen ulostulo on saturoitunut ja ulostulojännite on kanttiaalto. Osa paketeista demoduloitiin onnistuneesti, mutta osassa Costasin silmukan ulostulo näytti kuvan mukaiselta. Kanttiaallon kolmas harmoninen taajuus laskostuu hieman kanta-aaltotaajuudesta poikkeavalle taajuudelle, kun näytteenottotaajuus ei ole täsmälleen nelinkertainen kanta-aallon taajuuteen nähden. On mahdollista, että se aiheuttaa havaitun ongelman. Kyseistä ongelmaa ei havaittu ensimmäisissä testeissä, jolloin näytteenottotaajuus oli kuusin-

kertainen kanta-aaltotaajuuteen nähden. Ongelmaa ei kuitenkaan tutkittu nyt tarkemmin.

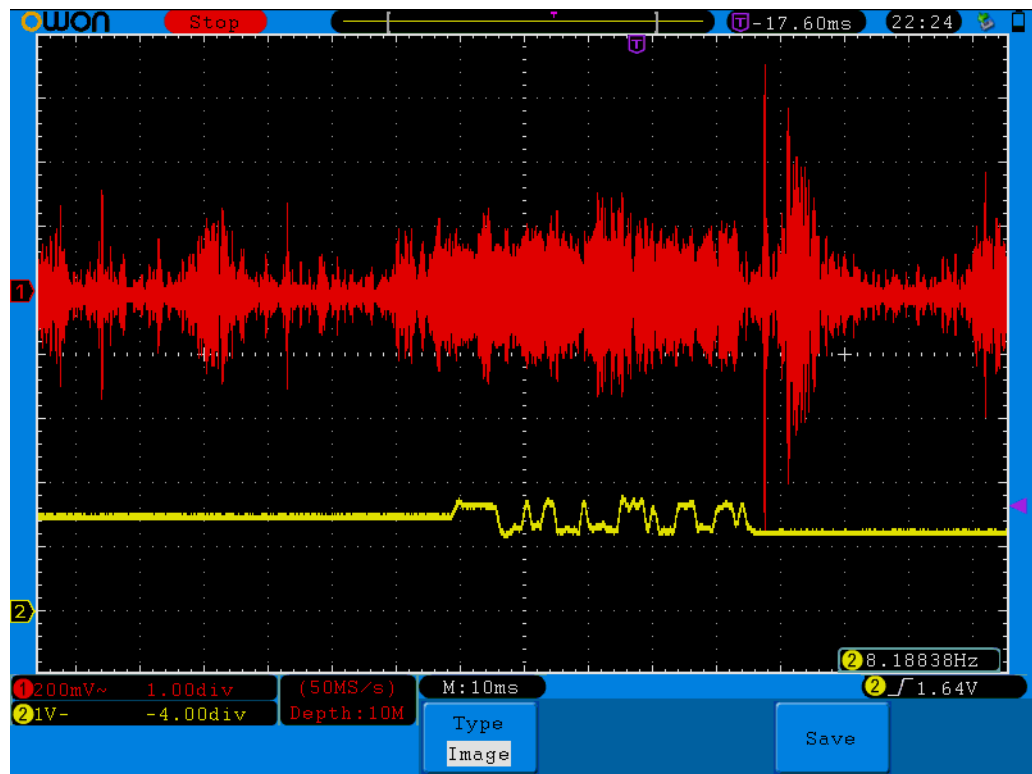


Kuva 7.22 Costasin silmukan (alla) virheellinen ulostulo vahvistimen ulostulon (yllä) saturoituessa.

Yleisesti voitiin todeta vastaanottimen toimivan hyvin haasteellisissakin tilanteissa. Esimerkiksi kuvassa 7.23 on vastaanotettu paketti onnistuneesti 100 m etäisyydeltä, kun anturi oli noin 8 m syvyydessä. Vahvistin- ja suodinkytkenä käytettiin 5000-kertaisesti vahvistavaa AD8648-operaatiovahvistimeen perustuvaa kytkentää. Kuvasta nähdään sekä signaalin että häiriöiden olevan samaa suuruusluokkaa.

Näyttölaitteen ohjelmaa muokattiin niin, että se esitti näytöllä tarkistussumman perusteella oikein vastaanotettujen pakettien lukumäärän ja kuluneen ajan sekunteina. Tämän avulla suoritettiin muutama koe, joiden avulla pyrittiin selvittämään, kuinka suuri osuus paketeista otetaan onnistuneesti vastaan erilaisissa olosuhteissa. Kokeissa veneellä liikuttiin suoraa linjaa viiden minuutin eli 300 s ajan. Tämän jälkeen luettiin näytöltä onnistuneesti vastaanotettujen pakettien lukumäärä. Tarkistussumma vaikutti toimivan luotettavasti, sillä käytännön testien yhteydessä havaittiin ainoastaan kaksi selvästi väärät sisältävää pakettia, joiden tarkistussumma täsmäsi. Kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 7.5.

Tulokset ovat odotetunlaisia. Etäisyyden kasvaessa virheellisten pakettien määrä kasvaa. Samoin virhetodennäköisyys kasvaa tuulisemmalla ilmalla. Sarakkeessa



Kuva 7.23 Onnistunut vastaanotto häiriöiden suhteen haastavassa tilanteessa. Costasin silmukan (alla) ja vahvistimen (yllä) ulostulo.

Tuuli (m/s)	Etäisyys (m)	Syvyys (m)	Kytkentä	Paketit	Osuus (%)	Suunta
0	50	1,3	TL974 1000	280	93	
		6,9	AD8648 5000	291	97	
	100	7,5		263	88	
	150	?		234	78	
5	50	2		174	58	V
		1,8		250	83	
		1,3		251	84	M

Taulukko 7.5 Onnistuneesti vastaanotetut paketit 300 s aikana eri olosuhteissa.

suunta V tarkoittaa, että kokeen aikana liikuttiin vastatuuleen. Vastaavasti M tarkoittaa kulkusuuntaa myötätuuleen. Kolmanneksi alimmalla rivillä esitetty tulos on selvästi muita heikompi. Osasy tähän on, että vene pääsi vastatuuleen edettäessä pari kertaa kääntymään selvästi, mikä saattoi aiheuttaa katkoksia. Pääsääntöisesti paketeista saatiin vastaanotettua onnistuneesti yli 80 %.

8. ARVIOINTI JA JATKOKEHITYS

Asetetut tavoitteet jäivät selkeästi saavuttamatta nopeusmittauksen osalta. Tulosten perusteella siipipyörään perustuvan mittauksen yleisyydelle vastaavissa järjestelmissä on hyvät syyt. Pitot-putkeen perustuvalla mittauksella saatiin sinänsä hyviä tuloksia, mutta käyttöolosuhteisiin sopivaa anturia ei löydetty. Tutkimusta sen suhteen on syytä jatkaa, jos markkinoille ilmaantuu sopuhintainen differentiaalinen paineanturi, joka soveltuu vedenalaiseen käyttöön ja on riittävän pienikokoinen soveluksen kannalta. Termisen mittauksen ongelmaksi ilmeni huono herkkyys mitta-alueella ja suuri tehonkulutus. Ratkaisua voisi ehkä jatkossa etsiä tutkimalla termistorin lämpötilan muutokseen perustuvaa mittausta kuten lähteessä [33] on esitetty.

Syvyys- ja lämpötilan mittauksen osalta asetetut tavoitteet saavutettiin sen sijaan hyvin. Molemmat voidaan mitata samalla pienikokoisella anturilla, jonka tarkkuus todettiin sovelluksen kannalta riittäväksi. Lämpötilan osalta tarkkuudessa luotettiin valmistajan ilmoitukseen. Syvyysmittauksen suhteen suoritetuissa kokeissa virheeksi arvioitiin enintään $\pm 0,2$ m. Koska ilmanpaine mitataan aluksi ennen upotusta, ajan myötä virhe voi kasvaa ilmanpaineen muuttuessa. Näin ollen kokonaisvirheeksi voitaneen arvioida $\pm 0,3$ m.

Myös akkujännitteen mitta- onnistui halutulla tarkkuudella. Akun suojaus alijännitteen varalta vaikutti toimivan ongelmitta. Akun kannalta anturissa on kuitenkin selkeä puute. Kytkentää ei ole suojattu mahdollisesta vikaantumisesta johtuvalta ylivirralla. Tämä voi ikävimmillään johtaa jopa tulipaloon, mikä on erityisen vaarallista, kun huomiodaan, että käyttö tapahtuu veneessä. Näin ollen tehölähdettä tulee ehdottomasti kehittää tämän varalle.

Tiedonsiirron kantama ylitti selvästi asetetut tavoitteet. Lisäksi lähetetyistä pake- teista pystyttiin vastaanottamaan pääsääntöisesti yli 80 %, mikä riittää hyvin sovelluksen kannalta. Etukäteen ongelmana pidetyillä heijastuksilla oli merkitystä lähinnä pystysuuntaisessa tiedonsiirrossa. Käytännön kokeissa ultraäänivastaanotin sijoitettiin veneen sivulle roikkumaan takilan laukaisijasta. Kalastettaessa johdot olisivat todennäköisesti tiellä kyseisessä sijainnissa. Näin ollen parempi sijoitus- paikka olisi veneen peräpeilissä, jolloin heijastukset voivat muodostua ongelmaksi. Jatkossa on syytä selvittää ongelman suuruus ja voidaanko mahdollinen ongelma ratkaista esimerkiksi sivulla 27 esitetyllä heijastimella.

Vahvistin- ja suodinkytkennän ulostulo sisälsi huomattavasti häiriöitä, jotka tosin eivät estäneet tavoitellun kantaman saavuttamista. Näitä vähentämällä olisi kuitenkin mahdollista edelleen parantaa onnistuneesti vastaanotettujen pakettien määrää. Jatkossa voisi siis tutkia myös, olisiko löydettävissä toisenlainen ultraäänivastaanottimen ja vahvistimen yhdistelmä, jolla vastaanottoa voitaisiin edelleen parantaa. Paremmin toimivan vastaanottimen ansiosta myös lähetystehoa voitaisiin pienentää ja näin joko kasvattaa anturin toiminta-aikaa tai pienentää sen kokoa pienemmän akun myötä.

Ainoa käytännön kokeissa havaittu selkeä ongelma tiedonsiirrossa oli demodulaattorin virheellinen toiminta vahvistimen ulostulon saturoituessa. Ongelma rajoittuu onneksi lyhyille etäisyyksille. On kuitenkin syytä tutkia, voidaanko tämä ratkaista yksinkertaisesti näytteenottotaajuutta muuttamalla. Mahdollisesti myös käytetyllä vahvistin- ja suodinkytkennällä voi olla merkitystä, koska kyseistä ongelmaa ei havaittu ensimmäisissä testeissä, jolloin käytettiin eri ohjelmisto- ja vahvistinversioita.

Vahvistin- ja suodinkytkennästä suunniteltujen eri versioiden välillä ei havaittu käytännössä merkittäviä eroja. Pienemmän vahvistuksen omaavilla kytkennöillä ulostulon taso oli matalampi, mutta kuitenkin riittävä toimivan demoduloinnin kannalta. Edellisessä kappaleessa esitettyä ongelmaa ajatellen pienemmän vahvistuksen omaavat kytkennät toimivat paremmin. Eri operaatiovahvistimien välisillä eroilla kohinassa ei ollut merkitystä, sillä muut häiriöt ylittivät kohinatason selvästi. Näin ollen myös pienen kohinan saavuttamiseksi tehty työ oli tältä kannalta ajatellen turhaa.

Jatkotutkimuksessa voisi selvittää, kuinka järjestelmässä voitaisiin käyttää useampia antureita samanaikaisesti. Ainakin kapeakaistaisia ultraäänilähettimiä ja -vastaanottimia käytettäessä vaihtoehtoksi jäänee aikajakoinen kanavointi. Yksi vaihtoehto on, että anturi lähettää tiedot satunnaisella ajanhetkellä tietyn aikaikkunan sisällä. Kahden anturin lähettäessä samaan aikaan tapahtuu törmäys, jolloin molemmat paketit menetetään. Jos ikkuna on sopivan kokoinen suhteessa paketin lähetyksen kuluvaan aikaan, törmäyksiä kuitenkin tapahtuu harvoin. Lähetettävään pakettiin tulee lisätä tiedot anturin tunnistamista varten.

Anturista ei tässä työssä suunniteltu koteloinniltaan käytännössä kalastukseen soveltuvaa mallia. Kuitenkin anturin piirilevyn jälkimmäinen versio on kooltaan jo sopiva. Sitä voidaan kuitenkin edelleen pienentää, kun toimimattomaksi todettu differentiaalinen paineanturi jätetään pois. Jatkossa tulee suunnitella lopullinen kotelointi. Siihen liittyvä seikka on esimerkiksi se, kuinka anturi kiinnitetään siimaan järkevästi.

Lopullisen näyttölaitteen suunnittelun pohjalle pohdittiin seuraavia seikkoja. Sopiva käyttöjännite on 12 V, joka on yleinen veneissä käytettävä akkujännite. Laajempi jännitealue on toki eduksi. Näytön tulee olla luettavissa kirkkaassa auringonpaisteessa ja sen tulee olla vähintään sadevedenkestävä. Lisäksi sen on hyvä olla riittävän suuri, jotta tiedot voidaan lukea nopealla vilkaisulla esimerkiksi siimojen laskun ohessa. Käyttöliittymän napit voitaneen toteuttaa kapasitiivisilla kosketusantureilla, mikä helpottaa kotelointia vedenkestävyyden kannalta. Mahdolliset vesipisarat kosketuspinnalla tulee huomioida suunnittelussa [10]. Ohjelmistoon olisi hyvä toteuttaa käyttöliittymän kautta muutettavat asetukset esimerkiksi veden tiheydelle ja vastaanottimen herkkyydelle.

9. YHTEENVETO

Työssä suunniteltiin reaaliaikaisen viehentarkkailujärjestelmän prototyyppi. Prototyyppi koostuu anturista, joka lähettää mitatut tiedot ultraäänellä veneessä sijaitsevalle näyttölaitteelle. Luvussa 2 asetetut tavoitteet saavutettiin hyvin lämpötilan, syvyyden ja akkujännitteen mittauksen osalta. Nopeuden mittausta ei valitettavasti onnistuttu toteuttamaan tutkituilla menetelmillä. Tiedonsiirron toteutus onnistui hyvin. Asetetut tavoitteet pystyttiin ylittämään niin kantaman kuin reaaliaikaisuudenkin osalta. Anturin lopullista kotelointia ei ole toistaiseksi suunniteltu, mutta se on toteutettavissa riittävän pienikokoisena.

Suure	Mittausalue	Resoluutio	Tarkkuus
Lämpötila	0–51,1°C	0,1°C	±1°C
Syvyys	0–102,3 m	0,1 m	±0,3 m
Akkujännite	3–4,2 V	0,05 V	±0,05 V

Taulukko 9.1 Järjestelmän tarjoamat mittaustulokset

Anturi lähettää mitatut tiedot kerran sekunnissa 48-bittisinä paketteina. Tiedonsiirto on toteutettu ultraäänellä käyttäen PSK-avainnusta. Kantoaallon taajuus on 32,25 kHz ja tiedonsiirtonopeus 1 kb/s. Demodulaattorina käytetään ohjelmallisesti toteutettua Costasin silmukkaa. Kokeissa suurin osa paketeista saatiin vastaanotettua jopa 150 m matkalta.

Anturin teholähteenä käytetään 10440-kokoista litiumioniakkua, jolla voidaan saavuttaa yli 30 h toiminta-aika. Akun suojaamiseksi alijännitteeltä anturi asetetaan lepotilaan, kun akkujännite on 3 V.

Toistaiseksi toteutettu näyttölaite rakentuu STM32F4DISCOVERY-kokeilualustan ympärille. Siihen liitettiin työssä suunniteltu vahvistin- ja suodinkytkentä sekä HD44780-yhteensopiva näyttö, jolla voidaan esittää 16×2 merkkiä. Näytöltä voidaan lukea onnistuneesti vastaanotettujen pakettien tiedot.

LÄHTEET

- [1] 10440 350mAh rechargeable li-ion battery 3.7v icr10440, verkkosivu, Keppower Technology. Saatavissa (viitattu 14.4.2016):
http://www.keppower.com.cn/products_detail.php?id=521.
- [2] 14500 3.7v icr 14500 li-ion rechargeable battery cell 750mAh, verkkosivu, Keppower Technology. Saatavissa (viitattu 14.4.2016):
http://www.keppower.com.cn/products_detail.php?id=386.
- [3] 1K2A1 Series V Thermistor, datasheet, TE Connectivity Sensor Solutions, 2015, 4 p. Saatavissa:
<http://www.te.com/usa-en/product-GA1K2A1.html>.
- [4] 400EP125, datasheet, Pro-Wave Electronics Corporation, 1 p. Saatavissa:
<http://prowave.com.tw/pdf/T400ep125.pdf>.
- [5] 400ET/R080, datasheet, Pro-Wave Electronics Corporation, 2 p. Saatavissa:
<http://prowave.com.tw/pdf/T400E08.PDF>.
- [6] AD8646/AD8647/AD8648: 24 MHz Rail-to-Rail Amplifiers with Shutdown Option, datasheet, Rev. E, Analog Devices, 2014, 20 p. Saatavissa:
http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8646_8647_8648.pdf.
- [7] I. F. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia, Underwater acoustic sensor networks: research challenges, Elsevier Ad Hoc Networks, Vol. 3, No. 3, 2005, pp. 257–279.
- [8] AN-1496: Noise, TDMA Noise, and Suppression Techniques, application report, Texas Instruments, 2013, 6 p. Saatavissa:
<http://www.ti.com/lit/an/snaa033d/snaa033d.pdf>.
- [9] Analog Filter Wizard, verkkosivu, Analog Devices. Saatavissa (viitattu 15.4.2016):
<http://www.analog.com/designtools/en/filterwizard/>.
- [10] Atmel AVR3002: Moisture Tolerant QTouch Design, application note, Atmel Corporation, 2012, 13 p. Saatavissa:
<http://www.atmel.com/images/doc42017.pdf>.
- [11] B. Benson, Design of a Low-cost Underwater Acoustic Modem for Short-Range Sensor Networks, dissertation, University of California, San

- Diego, USA, 2010, 158 p. Saatavissa:
<http://escholarship.org/uc/item/8j70s26c.pdf>.
- [12] R. E. Best, N. V. Kuznetsov, G. A. Leonov, M. V. Yuldashev, R. V. Yuldashev, A Survey on Dynamic Analysis of the Costas Loop, 2015, 62 p. Saatavissa: <http://arxiv.org/pdf/1511.04435v1>.
- [13] B. Butterfield, SLVA289A - Optimizing Transient Response of Internally Compensated dc-dc Converters With Feedforward Capacitor, application report, Texas Instruments, 2015, 11 p. Saatavissa:
<http://www.ti.com/lit/an/slva289a/slva289a.pdf>.
- [14] Cannon IntelliTroll Speed and Temp Monitor Owner's Manual, Johnson Outdoor Marine Electronics, 2009, 24 p. Saatavissa:
http://www.cannondownriggers.com/uploadedFiles/Service/Product_Manuals/Cannon_IntelliTroll_Manual_3397128RD.pdf.
- [15] X. Che, I. Wells, G. Dickers, P. Kear, X. Gong, Re-Evaluation of RF Electromagnetic Communication in Underwater Sensor Networks, IEEE Communications Magazine, Vol. 48, No. 12, 2010, pp. 143–151.
- [16] CL32B106KBJNNWE Characteristics Data, Samsung Electro-Mechanics, 2013, 1 p. Saatavissa:
http://www.samsungsem.com/kr/front/downloadcms.do?path=/kr/support/product-search/mlcc/__icsFiles/afieldfile/2014/11/05&fileName=C_CL32B106KBJNNWE.pdf.
- [17] J. P. Costas, Synchronous Communications, Proceedings of the IRE, Vol. 44, No. 12, 1956, pp. 1713–1718.
- [18] DMP2305, datasheet, Rev. 6-2, Diodes Incorporated, 2013, 6 p. Saatavissa:
http://www.diodes.com/_files/datasheets/ds31737.pdf.
- [19] J. Eco, A. Limjoco, AN-1368: Ferrite Bead Demystified, application note, Rev. 0, Analog Devices, 2015, 11 p. Saatavissa:
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1368.pdf>.
- [20] J. Feigin, Practical Costas loop design: Designing a simple and inexpensive BPSK Costas loop carrier recovery circuit, RF Signal Processing, 2002, pp. 20–36. Saatavissa: <http://mobiledevdesign.com/images/archive/0102Feigin20.pdf>.
- [21] Fish Hawk X4D Owner's Manual, Fish Hawk Electronics, 2015, 14 p. Saatavissa: <http://www.fishhawkelectronics.com/documents/653%20FH%20X4D%20Manual%20Rev%202-24-15.pdf>.

- [22] Fish Hawk X4D with Bluetooth® Smart wireless technology, verkkosivu, Fish Hawk Electronics. Saatavissa (viitattu 3.4.2016):
<http://www.fishhawkelectronics.com/marine-electronics/fish-hawk-x4d.html>.
- [23] M. Fortunato, Tutorial 5527: Temperature and Voltage Variation of Ceramic Capacitors, or Why Your $4.7\mu\text{F}$ Capacitor Becomes a $0.33\mu\text{F}$ Capacitor, Maxim Integrated, 6 p. Saatavissa:
<http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/TUT5527.pdf>.
- [24] S. Franco, Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, 3rd International Ed., McGraw-Hill, New York, USA, 2002, 658 p.
- [25] X. Gironés, C. Julià, D. Puig, Full Quadrant Approximations for the Arctangent Function, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 30, No. 1, 2013, pp. 130–135.
- [26] T. J. Hicks, J. K. Schwannecke, M. J. Norconk, A. M. Hellum, J. F. Foss, The Evolved 100kHz PWM-CTA, Proceedings of 20th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, Gottingen, Germany, 2003, pp. 236–241.
- [27] Ilmanpaine, verkkosivu, Ilmatieteenlaitos. Saatavissa (viitattu 30.3.2016):
<http://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmanpaine>.
- [28] M. T. Johannes, A Fixed-Point Phase Lock Loop in a Software Defined Radio, Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, 2002, 71 p.
- [29] Kalastuslaki, L 10.4.2015/379, 2015. Saatavissa:
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150379>.
- [30] C. Li, D. A. Hutchins, R. J. Green, Short-Range Ultrasonic Digital Communications in Air, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 55, No. 4, 2008, pp. 908–918.
- [31] LT3572: Dual Full Bridge Piezo Driver with 900mA Boost Converter, datasheet, Linear Technology, 12 p. Saatavissa:
<http://www.linear.com/docs/25682>.
- [32] X. Lurton, An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2010, 724 p.
- [33] L. Marques, G. Tomaszewski, A. T. de Aldemeida, Switched Thermal Anemometer, Proceedings of the 2008 IEEE International Instrumentation

and Measurement Technology Conference, Victoria, British Columbia, Canada, 2008, pp. 1783–1786.

- [34] MCP1700: Low Quiescent Current LDO, datasheet, Microchip Technology, 2013, 28 p. Saatavissa: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001826C.pdf>
- [35] C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White, R. T. Long, Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment, final report, The Fire Protection Research Foundation, Quincy, Massachusetts, USA, 2011, 112 p. Saatavissa: http://www.prba.org/wp-content/uploads/Exponent_Report_for_NFPA_-_201111.pdf.
- [36] J. P. Moore, A Thermistor Based Sensor for Flow Measurement in Water, Master's Thesis, Dublin City University, Ireland, 2003, 125 p. Saatavissa: http://doras.dcu.ie/18082/1/John_P_Moore.pdf.
- [37] Moor Sub-Troll 900, verkkosivu, Moor Electronics. Saatavissa(viitattu 3.4.2016): <http://moorelectronics.com/sub-troll-900.html>.
- [38] J. N. Moum, Ocean Speed and Turbulence Measurements Using Pitot-Static Tubes on Moorings, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 32, No. 7, 2015, pp. 1400–1413.
- [39] MP3V5004G Series, datasheet, 2nd Rev., Freescale Semiconductor, 2010, 14 p. Saatavissa: http://www.nxp.com/files/sensors/doc/data_sheet/MP3V5004G.pdf.
- [40] MS5525DSO, datasheet, Measurement Specialties, 2015, 20 p. Saatavissa: <http://www.meas-spec.com/product/pressure/MS5525DSO.aspx>.
- [41] MS5541C, datasheet, Measurement Specialties, 2014, 20 p. Saatavissa: http://www.meas-spec.com/product/t_product.aspx?id=5035.
- [42] MS5803-14BA, datasheet, Measurement Specialties, 2013, 18 p. Saatavissa: http://www.meas-spec.com/product/t_product.aspx?id=8684.
- [43] NTCASCWE3, datasheet, Vishay BCcomponents, 2014, 1 p. Saatavissa: <http://www.vishay.com/docs/29065/ntcascw.pdf>.
- [44] NTCLE100E3, datasheet, Vishay BCcomponents, 2012, 16 p. Saatavissa: <http://www.vishay.com/docs/29049/ntcle100.pdf>.
- [45] PMEG4015EPK, datasheet, NXP Semiconductors, 2012, 12 p. Saatavissa: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PMEG4015EPK.pdf.

- [46] J. G. Proakis, Digital Communications, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, USA, 1995, 928 p.
- [47] Radiotaajuusmääräys, Viestintävirasto, 2015, 2 s. Saatavissa (viitattu 4.4.2016): http://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/Viestintavirasto_4T2015M.pdf.
- [48] A. Reodique, W. Schultz, AN1646: Noise Considerations for Integrated Pressure Sensors, application note, 2nd Rev., Freescale Semiconductor, 2005, 6 p. Saatavissa: http://www.nxp.com/files/sensors/doc/app_note/AN1646.pdf.
- [49] A. Räisänen, A. Lehto, Radiotekniikan perusteet, 13. painos, Otatieto, Helsinki, 2011, 286 s.
- [50] Smart Troll, verkkosivu. Saatavissa(viitattu 3.4.2016): <http://www.smarttroll.com>.
- [51] STM32F051x4 STM32F051x6 STM32F051x8, datasheet, 6th Rev., STMicroelectronics, 2015, 121 p. Saatavissa: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00039193.pdf>.
- [52] RM0091 Reference Manual, reference manual, 8th Rev., STMicroelectronics, 2015, 1008 p. Saatavissa: http://www2.st.com/resource/en/reference_manual/dm00031936.pdf.
- [53] STM32F302x6 STM32F302x8, datasheet, 5th Rev., STMicroelectronics, 2015, 137 p. Saatavissa: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00093333.pdf>.
- [54] STM32F405xx STM32F407xx, datasheet, 7th Rev., STMicroelectronics, 2016, 201 p. Saatavissa: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>.
- [55] L. Svilainis, V. Dumbrava, Evaluation of the ultrasonic transducer electrical matching performance, Ultragarsas Journal, Vol. 62, No. 4, 2007, pp. 16–21.
- [56] Sääennätyksiä, verkkosivu, Ilmatieteenlaitos. Saatavissa (viitattu 30.3.2016): <http://www.ilmatieteenlaitos.fi/saaennatyksia>.
- [57] TL97x Output Rail-To-Rail Very-Low-Noise Operational Amplifiers, datasheet, Texas Instruments, 2015, 33 p. Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl971.pdf>.
- [58] E. Valtanen, Tekniikan Taulukkokirja, 16. painos, Genesis-Kirjat, Jyväskylä, 2008, 1152 s.

- [59] W. Gu, Tiny Dual Full-Bridge Piezo Motor Driver Operates from Low Input Voltage - Design Note 436, Linear Technology, 2008, 2 p. Saatavissa: <http://www.linear.com/docs/26215>.
- [60] Z. Yang, Y. Bai, Z. Zhao, Design and Implementation of the Digital Costas Loop Based on Software Defined Radio, Proceedings of the 2011 International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Beijing, China, 2011, pp. 687–690.
- [61] F. Yiu, G. Liu, Intelligent Digital Thermal Flow Sensor, Proceedings of IEEE Sensors 2003, Toronto, Canada, 2003, pp. 1225–1230.
- [62] H. Zumbahlen, Basic Linear Design Chapter 8: Analog Filters, Analog Devices, 2007, 144 p. Saatavissa: <http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/43-09/EDCh%208%20filter.pdf>.

LIITE A: DEMODULAATTORIN OHJELMAKOODI

```
1 // Mikko Elo, 2016
// demodulaattori.c
// Demoduloinnin hoitava ohjelmakoodi

5 #include <math.h>
#include "stm32f4xx.h"
#include "demodulate.h"

static uint32_t COS_SIN_TAU[256] =
10 {
    // Taulukkoa ei esitetä tilan säästämiseksi. Sisältää kosini- ja sinisignaalin arvot
    // yhden jakson ajalta. Kosini ylimmissä 16-bitissä ja sini alimmissa.
};

15 #define TUNNISTINPUSKURI_PITUUS 8 // Tulee olla kahden potenssi
#define TUNNISTIN_MITTAUSAIKA 384 // Noin 3 ms
#define TUNNISTIN_AMPLITUDIRAJA 50 // Signaalin amplitudi tulee olla tätä suurempi,
// jotta tunnistin reagoi

#define TUNNISTIN_TEHORAJA \
20 ((TUNNISTIN_AMPLITUDIRAJA * TUNNISTIN_AMPLITUDIRAJA) * \
(TUNNISTINPUSKURI_PITUUS >> 1))

#define DC_ALKUARVO 2048 // DC-tason oletus 1/2 Vcc
#define DC_PUSKURI_PITUUS 128 // Tulee olla kahden potenssi
25 #define DC_TASO_SHIFT 7 // Monta bittiä siirretään keskiarvon laskemiseksi

#define JAKSOJA_PER_BITTI 32
#define BITTEJA_PER_PAKETTI 40
#define FS_PER_FPSK 4 // Näytteenotto- ja kanta-aallon taajuuden suhde
30 #define PAKETTIVIIVE 6400 // Noin 50 ms @ 128 kHz fs
#define SYNKVIIVEAIKA (FS_PER_FPSK * 3 * JAKSOJA_PER_BITTI) // Noin 3 ms
// Hieman normaalin paketin pituutta pidempi viive, jolla valvotaan, ettei
// demodulaattori jää jumiin
#define VAHTIVIIVE (FS_PER_FPSK * (BITTEJA_PER_PAKETTI + 10) * JAKSOJA_PER_BITTI)
35 #define PI_SUOD_B0 10376936.05f // Silmukkasuotimen kertoimet (fn = 140 Hz,
#define PI_SUOD_B1 -10327033.92f // d = 1/sqrt(2)
#define NCO_PERUS_TAAJUUS (4294967296.f/FS_PER_FPSK) //Taaajuus f0 = fs/4

#define SUMMA_PUSKURI_PITUUS 80 // Costasin silmukan suotimien pituus
40
typedef struct // Tietue tunnistimen tilan esittämiseksi
{
    uint32_t puskuri[TUNNISTINPUSKURI_PITUUS];
    uint32_t
45     summa,
    aikalaskuri,
    puskuriIdx;
} Tunnistintila_t;

50 static Tunnistintila_t Tunnistin;

__attribute__((always_inline)) static inline void tunnistinAlusta(void)
{
    uint32_t i;
55     for(i = 0; i < TUNNISTINPUSKURI_PITUUS; i++)
```

```

    {
        Tunnistin.puskuri[i] = 0;
    }
    Tunnistin.summa = 0;
60    Tunnistin.puskuriIdx = 0;
    Tunnistin.aikalaskuri = 0;
}

// Palauttaa 1, jos vastaanotetun signaalin teho on riittävän kauan suurempi kuin
65 // asetettu tehoraja.
__attribute__((always_inline)) static inline
uint32_t tunnistaSignaali(int32_t nayte)
{
70    uint32_t teho = nayte * nayte; // Lasketaan teho

    // Liukuva summa
    Tunnistin.summa -= Tunnistin.puskuri[Tunnistin.puskuriIdx];
    Tunnistin.summa += teho;
75    Tunnistin.puskuri[Tunnistin.puskuriIdx] = teho;
    Tunnistin.puskuriIdx++;
    Tunnistin.puskuriIdx &= TUNNISTINPUSKURI_PITUUS - 1;

    Tunnistin.aikalaskuri++; // Kasvatetaan aikaa, jonka ajan teho on ylittänyt rajan
80    if(Tunnistin.summa < TUNNISTIN_TEHORAJA)
    {
        Tunnistin.aikalaskuri = 0; // Teho alle rajan -> nollataan laskuri
    }
    return (Tunnistin.aikalaskuri >= TUNNISTIN_MITTAUSAIKA) ? 1 : 0;
85 }

typedef struct
{
    int16_t naytePuskuri[DC_PUSKURI_PITUUS];
90    int32_t summa;
    uint32_t puskuriIdx;
} DCTila_t;

static DCTila_t DCTila;

95
__attribute__((always_inline)) static inline void DCalusta(void)
{
    uint32_t i;
    for(i = 0; i < DC_PUSKURI_PITUUS; i++)
100    {
        DCTila.naytePuskuri[i] = DC_ALKUARVO;
    }
    DCTila.summa = DC_PUSKURI_PITUUS * DC_ALKUARVO;
    DCTila.puskuriIdx = 0;
105 }

// Määrittää DC-tason signaalin keskiarvosta tietyltä ajalta. Kyseinen taso
// vähennetään parametrina annetusta näytteestä ja tulos palautetaan.
__attribute__((always_inline)) static inline int16_t poistaDC(int16_t nayte)
110 {
    DCTila.summa -= DCTila.naytePuskuri[DCTila.puskuriIdx];
    DCTila.naytePuskuri[DCTila.puskuriIdx] = nayte;
    DCTila.puskuriIdx++;
    DCTila.puskuriIdx &= (DC_PUSKURI_PITUUS - 1);
115    DCTila.summa += nayte;

    uint32_t dcTaso = (DCTila.summa + (1 << (DC_TASO_SHIFT - 1))) >> DC_TASO_SHIFT;

```

```

        return (nayte - dcTaso);
    }
120
    // Laskee atan-approksimaation
    __attribute__((always_inline)) static inline
    float vaihevertailu(int32_t x, int32_t y)
    {
125     if(x == 0)
        {
            return 0.f;
        }
        else if(y == 0)
130     {
            return 1.f;
        }
        else // atan-approksimaatio lähteestä Girones et al., Full Quadrant
              // Approximations for the Arctangent Function
135     {
        const float B = 0.596227;
        float jako = (float)x / (float)y;
        float bx_jako = fabsf(B * jako);
        float temp = bx_jako + jako * jako;
140     float res = temp / (1.f + bx_jako + temp);
        return (jako < 0) ? res : -res; // Palautetaan tulos negatiivisena
    }
    }
145
typedef struct // Tietue Costasin silmukan tilan esittämiseksi
{
    uint32_t
        NCOVaihe,
150     bittikelloVaihe,
        puskuriIdx;
    int64_t
        ISumma,
        ISummaEd,
155     QSumma;
    int32_t
        IPuskuri[SUMMA_PUSKURI_PITUUS],
        QPuskuri[SUMMA_PUSKURI_PITUUS];
    float
160     vaihevirheEd,
        uf;
    uint8_t
        lueBitti;
165 } Costas_t;

static Costas_t Costas;

__attribute__((always_inline)) static inline void CostasAlusta(void)
170 {
    uint32_t i;
    for(i = 0; i < SUMMA_PUSKURI_PITUUS; i++)
    {
        Costas.IPuskuri[i] = 0;
175     Costas.QPuskuri[i] = 0;
    }
    Costas.NCOVaihe = 0;
    Costas.puskuriIdx = 0;
    Costas.ISumma = 0;

```

```

180     Costas.QSumma = 0;
        Costas.lueBitti = 0;
        Costas.uf = 0;
        Costas.vaihevirheEd = 0;
        DAC->DHR12R2 = 2047;

185     }

        // Aliohjelma suorittaa Costasin silmukan yhden näytteen osalta
        __attribute__((always_inline)) static inline void CostasSilmukka(int16_t nayte)
190     {
        // NCO:n ulostulot
        uint32_t sinCosKertojat = COS_SIN_TAUULU[Costas.NCOVaihe >> 24];

        // Kertojat
195     int32_t IHaara = nayte * (int16_t)(sinCosKertojat >> 16);
        int32_t QHaara = nayte * (int16_t)(sinCosKertojat & 0xFFFF);

        Costas.ISummaEd = Costas.ISumma; // Edellinen arvo talteen nollanylityksen
        // havaitsemista varten
200     // Alipäästösuodatus summaimilla
        Costas.ISumma = (Costas.ISummaEd - Costas.IPuskuri[Costas.puskuriIdx]) + IHaara;

        Costas.QSumma -= Costas.QPuskuri[Costas.puskuriIdx];
        Costas.QSumma += QHaara;

205     Costas.IPuskuri[Costas.puskuriIdx] = IHaara;
        Costas.QPuskuri[Costas.puskuriIdx] = QHaara;

        Costas.puskuriIdx++;
210     if(Costas.puskuriIdx == SUMMA_PUSKURI_PITUUS)
        {
            Costas.puskuriIdx = 0;
        }

215     // Vaihevertailu
        float vaihevirhe = vaihevertailu(Costas.QSumma, Costas.ISumma);

        // Silmukkasuodatin
        Costas.uf += PI_SUOD_B0 * vaihevirhe + PI_SUOD_B1 * Costas.vaihevirheEd;
220     Costas.vaihevirheEd = vaihevirhe;

        // NCO:n uusi vaihe
        float vaihemuutos = NCO_PERUS_TAAJUUS + Costas.uf;
        Costas.NCOVaihe += (uint32_t)(vaihemuutos + 0.5f);

225     // Bittikellon uusi vaihe
        vaihemuutos *= (1.f/(float)JAKSOJA_PER_BITTI);
        uint32_t bittikelloUusiVaihe =
            Costas.bittikelloVaihe + (uint32_t)(vaihemuutos + 0.5f);

230     // Uusi bitti luetaan bittikellon jakson puolivälissä
        Costas.lueBitti = (uint8_t)((~Costas.bittikelloVaihe) >> 31) &
            (bittikelloUusiVaihe >> 31));

235     Costas.bittikelloVaihe = bittikelloUusiVaihe;

        // Costas-silmukan ulostulo skaalattuna DA-muuntimelle testausta varten
        int64_t debug = Costas.ISumma / 1000000;
        debug = debug > 2047 ? 2047 : debug;
240     debug = debug < -2048 ? -2048 : debug;
        debug += 2048;

```

```

DAC->DHR12R1 = (uint16_t) (debug);

DAC->DHR12R2 = Costas.bittikelloVaihe >> 20;
245 }

// Demodulaattorin tilat
typedef enum {EI_SIGNAALIA, SYNK_ODOTUS, SYNK_VIIVE, HAE_VAIHE,
             VASTAANOTTO, TAUKO} DemodulaattoriTila_t;
250
typedef struct
{
    DemodulaattoriTila_t tila;
    int16_t puskuri[TUNNISTIN_MITTAUSAIKA];
255    uint32_t
        viive,
        bittilaskuri,
        puskuriIdx;
    uint32_t invertointi;
260 } Demodulaattori_t;

static Demodulaattori_t Demodulaattori;

void demodulaattoriAlusta(void)
265 {
    uint32_t i;
    for(i = 0; i < TUNNISTIN_MITTAUSAIKA; i++)
    {
        Demodulaattori.puskuri[i] = 0;
270    }
    Demodulaattori.tila = EI_SIGNAALIA;
    Demodulaattori.puskuriIdx = 0;

    DCAIusta();
275    CostasAlusta();
    tunnistinAlusta();
}

// Demoduloi signaalin. Jos paketti on vastaanotettu, palauttaa 1, jolloin
280 // parametrina annettu taulukko sisältää vastaanotetun paketin.
uint32_t demoduloi(uint16_t uusiNayte, uint8_t *datapuskuri)
{

    int16_t vanhaArvo = Demodulaattori.puskuri[Demodulaattori.puskuriIdx];
285    int16_t uusiArvo = poistaDC(uusiNayte);
    Demodulaattori.puskuri[Demodulaattori.puskuriIdx] = uusiArvo;

    Demodulaattori.puskuriIdx++;
    if(Demodulaattori.puskuriIdx == TUNNISTIN_MITTAUSAIKA)
290    {
        Demodulaattori.puskuriIdx = 0;
    }

    uint32_t uusiBitti, pakettiVastaanotettu = 0;
295

    switch(Demodulaattori.tila)
    {
        // Tutkitaan, onko signaalia tarjolla
        case EI_SIGNAALIA:
300            if(tunnistaSignaali((int32_t)uusiArvo))
            {
                Demodulaattori.tila = SYNK_VIIVE;
                Demodulaattori.viive = SYNKVIIVEAIKA;

```

```

    }
305     break;
    case TAUKO:
    default:

        // Joko tauko päättynyt tai vahtiviive kulunut nollaan
310     if(--Demodulaattori.viive == 0 && Demodulaattori.tila != SYNK_VIIVE)
    {
        Demodulaattori.tila = EI_SIGNAALIA;
        CostasAlusta();
        tunnistinAlusta();
315     DAC->DHR12R1 = 2047;
        uint32_t i;
        for(i = 0; i < TUNNISTIN_MITTAUSAIKA; i++)
        {
            Demodulaattori.puskuri[i] = 0;
320        }
        break;
    }
    if(Demodulaattori.tila == TAUKO)
    {
325     break; // Tauolla ei suoriteta Costasin silmukkaa
    }

    CostasSilmukka(vanhaArvo); // Muissa tiloissa näyte syötetään
                                // Costasin silmukkaan
330     switch(Demodulaattori.tila)
    {
        // Aluksi I-haaran polariteetti voi vaihdella esim. kohinan
        // vuoksi, joten odotetaan hetki ennenkuin ryhdytään
        // tarkkailemaan nollanylitystä
335     case SYNK_VIIVE:
        if(--Demodulaattori.viive == 0)
        {
            Demodulaattori.tila = SYNK_ODOTUS;
            Demodulaattori.viive = VAHTIVIIVE;
340        }
        break;
        // Synkronoidaan bittikello, kun saadaan nollanylitys
        case SYNK_ODOTUS:
        // Tapahtuiko nollanylitys?
345     if((Costas.ISumma ^ Costas.ISummaEd) >> 63)
        {
            Costas.bittikelloVaihe = 0;
            Demodulaattori.tila = HAE_VAIHE;
        }
350     break;
        // Costas-silmukan ulostulo voi olla invertoitu riippuen lukittuuko
        // PLL samaan vai vastakkaiseen vaiheeseen kanta-aallon kanssa. Tämä
        // päätellään synkronointibitistä.
        case HAE_VAIHE:
355     if(Costas.lueBitti)
        {
            Demodulaattori.invertointi = Costas.ISumma > 0 ? 1 : 0;
            Demodulaattori.tila = VASTAANOTTO;
            Demodulaattori.bittilaskuri = 0;
360        }
        break;
        // Vastaanotetaan paketti
        case VASTAANOTTO:
        if(Costas.lueBitti)
365     {

```

```

        uusiBitti = Costas.ISumma > 0 ? 1 : 0;
        if(uusiBitti ^ Demodulaattori.invertointi)
        {
            datapuskuri[Demodulaattori.bittilaskuri >> 3] |=
370         1 << (7 - (Demodulaattori.bittilaskuri & 7));
        }
        if(++Demodulaattori.bittilaskuri == BITTEJA_PER_PAKETTI)
        {
            // Paketin vastaanottamisen jälkeen pidetään tauko, koska
375         // seuraava paketti on tulossa vasta sekunnin kuluttua
            Demodulaattori.tila = TAUKO;
            Demodulaattori.viive = PAKETTIVIIVE;
            pakettiVastaanotettu = 1;
        }
380         default:
            break;
    }
}
return pakettiVastaanotettu;
385 }

```


LIITE B: OHJELMAKOODI

TERMISTORIKYTKENNÄN TESTAUKSEEN

```
1 // Mikko Elo, 2016
  // Testiohjelma termistorilla tapahtuvaan virtausmittaukseen

#include "stm32f0xx.h"

5
// Ajastimen TIM1 sieppauskeskeytyskäsitteijä
void TIM1_CC_IRQHandler(void)
{
    static uint32_t laskuri = 0;
10    static uint16_t taulukko[1024] = {};
    static uint32_t summa = 0;

    // Keskiarvoistetaan 1024 sieppauksen tulokset (noin 1 s)
    summa -= taulukko[laskuri];
15    uint32_t temp = TIM1->CCR4;
    summa += temp;
    taulukko[laskuri] = temp;
    laskuri++;
    laskuri %= 1023;
20    temp = (summa + 512) >> 10; // Pyöristys + jako

    // Suodatettu tulos tarjolle 2-kanavan ulostuloon
    TIM1->CCR2 = temp;
    TIM1->SR = 0; // Nollataan keskeytyslippu
25 }

// Ajastimen TIM1 alustus
void tim1Alusta(void)
{
30    RCC->APB2ENR |= RCC_APB2ENR_TIM1EN;

    TIM1->ARR = 47999; // f = 1 kHz
    TIM1->CCR3 = 47998; // Lähes 100% pulssinleveys, jos lämpötilaraja ei ylitä

35    // Kanavalla 2 esitetään suodatettu pulssinleveys, kanava 3 tuottaa
    // PWM-signaalin termistorille, kanava 4 mittaa pulssinleveyttä
    TIM1->CCMR2 =
        TIM_CCMR2_CC4S_1 | // CH4 capture input -> CH3
        TIM_CCMR2_OC3CE | // OC3 clear enable
40    TIM_CCMR2_OC3M_2 | TIM_CCMR2_OC3M_1 | // PWM tila 1
        TIM_CCMR2_OC3PE; // OC3Preload enable (oltava päällä PWM-tilassa)
    TIM1->CCMR1 =
        TIM_CCMR1_OC2M_2 | TIM_CCMR1_OC2M_1 | // PWM tila 1
        TIM_CCMR1_OC2PE; // OC2PE oltava päällä
45    TIM1->CCER =
        TIM_CCER_CC4P | // Ch4 sieppaus laskevalla reunalla
        TIM_CCER_CC4E | // Ch4 sieppaus päälle
        TIM_CCER_CC3E | // OC3 ulostulo päälle
        TIM_CCER_CC2E; // OC2 ulostulo päälle
50    TIM1->BDTR = TIM_BDTR_MOE; // Ulostulo päälle
    TIM1->CR1 = TIM_CR1_ARPE | TIM_CR1_CEN; // Ajastin päälle
    TIM1->DIER = TIM_DIER_CC4IE; // Kanavan 4 sieppauskeskeytys päälle
}

55 // Analogisen komparaattorin alustus
```

```

void compAlusta(void)
{
    RCC->APB2ENR |= RCC_APB2ENR_SYSCFGEN; // SYSCFG ja komparaattori
    COMP->CSR = // jakaa kellon
60    COMP_CSR_COMP2OUTSEL_1 | COMP_CSR_COMP2OUTSEL_0 | // Ulostulo -> OC1_CLR
    COMP_CSR_COMP2INSEL_2 | // Invertoiva sisäänmeno -> PA4 (DAC_OUT)
    COMP_CSR_COMP2EN; // Komparaattori päälle
}

65 // DA-muuntimen alustus
void DACAlusta(void)
{
    RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_DACEN;
    DAC->CR =
70    DAC_CR_BOFF1 | // Ei bufferivahvistinta käyttöön
    DAC_CR_EN1; // DA-muunnin päälle
    DAC->DHR12R1 = 2176; // 1k NTC @ 45C
}

75 int main(void)
{
    RCC->AHBENR |= RCC_AHBENR_GPIOAEN | RCC_AHBENR_GPIOBEN;
    // Valitaan nastojen PA2, PA9 ja PA10 vaihtoehtoiset toiminnat
    GPIOA->AFR[0] = (7 << 8); //COMP2_OUT -> PA2
80    GPIOA->AFR[1] = (2 << 8) | (2 << 4); // TIM1_CH3 -> PA10, TIM1_CH2 -> PA9
    // Alustetaan IO-nastojen tila
    GPIOA->MODER |=
        GPIO_MODER_MODER10_1 | // PA10 -> alt (TIM1_CH3)
        GPIO_MODER_MODER9_1 | // PA9 -> alt (TIM1_CH2)
85    GPIO_MODER_MODER8_0 | // PA8 -> out (/SHDN)
        GPIO_MODER_MODER4 | // PA4 -> ana (comp-)
        GPIO_MODER_MODER3 | // PA3 -> ana (comp+)
        GPIO_MODER_MODER2_1 | // PA2 -> alt (comp out)
        GPIO_MODER_MODER1_0 | // PA1 -> out (LED1)
90    GPIO_MODER_MODER0_0; // PA0 -> out (LED2)
    GPIOB->MODER |=
        GPIO_MODER_MODER2_0 | // PB2 -> out (/SHDNA)
        GPIO_MODER_MODER1_0; // PB1 -> out (/SHDNB)

95    DACAlusta();

    // Käynnistetään LT3572:n hakkuri
    GPIOA->BSRR = (1 << 8); // /SHDN ylös
    while(GPIOB->IDR & 1)
100    {
        //...Odotellaan, että /PGOOD nousee
    }
    GPIOB->BSRR = (1 << 1) | (1 << 2); // /SHDNA ja /SHDNB ylös

105    tim1Alusta();
    compAlusta();
    NVIC_EnableIRQ(TIM1_CC_IRQn); // Ajastimen TIM1 sieppauskeskeytys päälle
    while(1) // Ohjelman toiminta tapahtuu keskeytyksissä
    {
110    }
}

```

LIITE C: OHJELMAKOODI

MP3V5004-ANTURIN TESTAUKSEEN

```
1 // Mikko Elo, 2015
// Ohjelmakoodi MP3V5004-paineanturilla tapahtuvan
// nopeusmittauksen testaamiseen
#include "hd44780.h"
5 #include "gpio_macros.h"
#include "stm32f0xx.h"
#include <stdio.h>
#include <math.h>

10 uint16_t nayteTaulu[256];
volatile uint8_t DMALippu;

// DMA:n keskeytyskäsitteittäjä
void DMA1_Channel1_IRQHandler(void)
15 {
    DMALippu = 1;
    DMA1->IFCR = 0xFFFFFFFF;
}

20 // DMA:n alustus
void DMAAlusta(void)
{
    // Kerätään 256 AD-muuntimen näytettä taulukkoon nayteTaulu
    RCC->AHBENR |= RCC_AHBENR_DMA1EN;
25 DMA1_Channel1->CPAR = (uint32_t) &(ADC1->DR);
    DMA1_Channel1->CMAR = (uint32_t) nayteTaulu;
    DMA1_Channel1->CNDTR = 256;
}

30 void MP3V5004Mittaa(void)
{
    TIM3->CNT = 0; // Nollataan laskuri
    TIM3->CR1 = TIM_CR1_CEN; // Laskuri käyntiin
    // DMA käyntiin
35 DMA1_Channel1->CCR =
    DMA_CCR_MSIZE_0 | DMA_CCR_PSIZE_0 | // 16-bit siirto
    DMA_CCR_MINC | // Muistiosoitetta kasvatetaan joka siirrolla
    DMA_CCR_CIRC | // Rengaspuskuri -> lopuksi palataan ensimmäiseen alkioon
    DMA_CCR_TCIE | // Keskeytys, kun kaikki siirrot on tehty
40 DMA_CCR_EN; // DMA päälle
    // Mahdollistetaan AD-muunnokset aina ajastimen 3 triggerillä
    ADC1->CR = ADC_CR_ADSTART | ADC_CR_ADEN;

    while(!DMALippu) // Odotetaan, että haluttu määrä muunnoksia on tehty
45 {
        __WFI(); // Odotellaan unitilassa (suoritin seis)
    }
    DMALippu = 0; // Nollataan lippu
    TIM3->CR1 = 0; // Pysäytetään TIM3
50 }

// Alustetaan TIM3
void tim3Alusta(void)
{
55 RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_TIM3EN;
```

```

        TIM3->ARR = 18749;    // Laskuri pyörrähtää ympäri 2,56 kHz taajuudella
        TIM3->CR2 = TIM_CR2_MMS_1; // Liipaisu AD-muuntimelle laskurin pyörrähtäessä
    }                        // ympäri

60 // Alustetaan AD-muunnin
    void ADCAlusta(void)
    {
        RCC->APB2ENR |= RCC_APB2ENR_ADC1EN;
        RCC->AHBENR |= RCC_AHBENR_GPIOAEN;
65 // PA0 analogiseksi (MP3V5004 ulostulo)
        GPIOA->MODER |= GPIO_ANALOG_PINS(1 << 0);

        // AD-muuntimen 14 MHz oskillaattori käyntiin
        RCC->CR2 |= RCC_CR2_HSI14ON;
70 while(!(RCC->CR2 & RCC_CR2_HSI14RDY))
    {
        // Odotellaan kellon käynnistymistä
    }

75 // AD-muuntimen kalibrointi
        ADC1->CR = ADC_CR_ADCAL;
        while(ADC1->CR & ADC_CR_ADCAL)
        {
            // Odotellaan, että kalibrointi valmistuu
80 }

        // AD-muunnin päälle
        ADC1->CR = ADC_CR_ADEN;
        while(!(ADC1->ISR & ADC_ISR_ADRDY))
85 {
            // Odotellaan, että AD-muunnin on valmis
        }
        ADC1->ISR = ADC_ISR_ADRDY; // Nollataan lippu
        ADC1->CFGR1 =
90     ADC_CFGR1_OVRMOD | // Näyte ylikirjoitetaan, jos DMA ei ehdi hakea
        ADC_CFGR1_EXTEN_0 | // Muunnos ulkoisen liipaisun nousevalla reunalla
        ADC_CFGR1_EXTSEL_1 | ADC_CFGR1_EXTSEL_0 | // Valitaan TIM3 liipaisu
        ADC_CFGR1_DMAEN; // Siirtopyyntö DMA:lle muunnoksen valmistuessa
        ADC1->SMPR = ADC_SMPR1_SMPR; // Näytteistysaika ~17 us
95 ADC1->CHSELR = ADC_CHSELR_CHSEL0; // Muunnos kanavalta 0 (PA0)
    }

    // Laskee keskiarvon nayteTaulun alkioista
    int32_t laskeKA256(void)
100 {
        uint32_t i, summa = 0;
        for(i = 0; i < 256; i++)
        {
            summa += nayteTaulu[i];
105 }
        summa += 128;
        summa >>= 8;
        return summa;
    }

110 // Mittaa paineanturin offset-jännitteen, kun paine-ero on 0
    int32_t mittaaOffset(void)
    {
        uint32_t offsetSumma = 0, i;
115 // Lasketaan keskiarvo 16384 näytteestä
        for(i = 0; i < 64; i++)
        {

```

```

        MP3V5004Mittaa();
        offsetSumma += laskeKA256();
120    }
        offsetSumma += 32; // Pyöristys
        offsetSumma >>= 6; // Jako 64:llä
        return offsetSumma;
    }
125
int main(void)
{
    int32_t nopeusTaulu[64] = {};
    int32_t nopeusSumma = 0;
130    uint32_t idx = 0;

    hd44780Alusta(); // Alustetaan LCD-näyttö
    DMAAlusta();
    ADCAlusta();
135    tim3Alusta();

    NVIC_EnableIRQ(DMA1_Channel1_IRQn); // DMA-keskeytys päälle

    int32_t offset = mittaaOffset(); // Mitataan offset ennen upotusta
140    int32_t mittaus;

    while(1)
    {
        MP3V5004Mittaa(); // Suoritetaan 256 mittausa...
145        mittaus = laskeKA256(); // ...ja lasketaan niiden keskiarvo

        // Lasketaan liukuva keskiarvo noin 6,4 s ajalta
        nopeusSumma -= nopeusTaulu[idx];
        nopeusTaulu[idx] = mittaus;
150        nopeusSumma += mittaus;
        idx++;
        idx &= 63;

        int32_t mittausKA = nopeusSumma + 32; // Pyöristys
155        mittausKA >>= 6; // Jako 64:llä

        // Tulostetaan AD-muuntimen hetkellinen ulostulo ja sen liukuva keskiarvo
        // riville 1
        hd44780GotoXY(0, 0);
160        printf("%8d%8d", (int16_t)mittaus, (int16_t)mittausKA);
        fflush(stdout);

        mittaus -= offset; // Vähennetään mitattu offsetjännite...
        if(mittaus < 0) // ...ja varmistetaan, että tulos on positiivinen,
165        { // jotta neliöjuuren otossa ei tule ongelmia
            mittaus = 0;
        }
        mittausKA -= offset;
        if(mittausKA < 0)
170        {
            mittausKA = 0;
        }

        // Tuloksena 2 * 3,6^2 * paine / 1000 (muunnos yksiköihin km/h, veden
175        // tiheydelle oletettu arvo 1000 kg/m^3)
        float nopeus = 0.031648352f * mittaus;
        nopeus = sqrtf(nopeus); // Tuloksena nopeus yksiköissä km/h
        float nopeusKA = 0.031648352f * mittausKA;
        nopeusKA = sqrtf(nopeusKA);

```

```
180      // Tulostetaan hetkellinen nopeus ja liukuva keskiarvo riville 2
      hd44780GotoXY(0, 1);
      printf("%.2f%.2f", nopeus, nopeusKA);
      fflush(stdout);
185  }
}
```